

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**SIMULACE KOMUNIKAČNÍ ČÁSTI MODERNÍCH  
PRŮMYSLVÝCH SÍTÍ**

SIMULATION OF COMMUNICATION PART OF MODERN INDUSTRIAL NETWORKS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Pavel Beneš**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Radek Fujdiak, Ph.D.**

**BRNO 2019**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Pavel Beneš

**ID:** 195976

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### **Simulace komunikační části moderních průmyslových sítí**

#### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Student provede analýzu komunikačních protokolů využívaných v průmyslovém prostředí, převážně se pak zaměří na konkrétní protokoly tase.2/ICCP, IEC61850, IEC60870-5-104, DNP3, a DLMS/COSEM. Bude proveden výběr softwarového prostředí pro simulaci (doporučeno vybírat z NS3/NS2, OPNET, a OMNET++). Výběr bude proveden na základě jasně stanovených parametrů, dostupnosti protokolů, možnosti pro rozšíření, měření a další. Následně budou implementovány jednotlivé protokoly do vybraného simulačního prostředí. Hlavní výstup práce, simulační prostředí, bude jednoduše upravitelný (jednoduchá integrace nových protokolů), škálovatelný (jednoduchá úprava komunikačních scénářů, množství účastníků, aj.), modulární (jednoduchá výměna bloků, implementace komunikačních protokolů aj.) a bude umožněn přístup do samotné komunikace (např. přes virtuální porty). V neposlední řadě bude umožněno nahrávání komunikace pomocí \*.pcap souborů (např. integrací přes Wireshark či jiným vybraným způsobem).

#### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] WILAMOWSKI, Bogdan M. a J. David IRWIN. Industrial communication systems. 2nd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, c2011. Electrical engineering handbook series. ISBN 978-1439802816.

[2] CHAMBERLAIN, Thomas. Learning OMNeT++. Birmingham: Packt Publishing, 2013. ISBN 978-1849697149.

**Termín zadání:** 1.2.2019

**Termín odevzdání:** 16.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Radek Fujdiak, Ph.D.

**Konzultant:**

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
předseda oborové rady

#### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato práce je zaměřená na simulaci protokolů z normy IEC 61850 v simulačním nástroji OMNeT++. Teoretická část práce se zabývá popisem oblasti operačních technologií, dispečerského řízení a sběru dat a protokoly Tase-2/ICCP, IEC 61850, IEC 60870-5-104, DNP 3 a DLMS/COSEM. Dále se tato část zabývá parametry ovlivňující spojení a popis simulačních nástrojů NS2/NS3, OPNET a OMNeT++. V praktické části je vytvořena síť obsahující protokoly z normy IEC 61850 v simulačním programu OMNeT++. Na té je následně odměřeno jednosměrné zpoždění a ztrátovost paketů s narůstajícím provozem.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Dispečerské řízení a sběr dat, DLMS/COSEM, DNP 3, IEC 60870-5-104, IEC 61850, OMNeT++, jednosměrné zpoždění, operační technologie, Tase-2/ICCP, ztrátovost paketů

## ABSTRACT

The thesis is focused on simulating of protocols from standard IEC 61850 in simulation tool OMNeT++. The theoretical part in the thesis deals with description of the field of operating technologies, supervisory control and data acquisition and protocols Tase-2/ICCP, IEC 61850, IEC 60870-5-104, DNP 3 and DLMS/COSEM. Next part deals with parameters influencing connection and description of simulation tools NS2/NS3, OPNET and OMNeT++. In the practical part there is created a network containing protocols from the standard IEC 61850 in the simulation program OMNeT++. Then in the network a end to end delay and packet loss with increasing traffic is measured.

## KEYWORDS

End to end delay, DLMS/COSEM, DNP 3, IEC 60870-5-104, IEC 61850, OMNeT++, operational technology, packet loss, supervisory control and data acquisition Tase-2/ICCP

BENEŠ, Pavel. *Simulace komunikační části moderních průmyslových sítí*. Brno, 2019, 62 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Radek Fujdiak, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Simulace komunikační části moderních průmyslových sítí“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Radku Fujdiakovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
podpis autora(-ky)

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>1 Operační technologie</b>	<b>13</b>
1.1 Dispečerské řízení a sběr dat . . . . .	15
1.2 Komunikační technologie . . . . .	16
1.2.1 Kabelové technologie . . . . .	16
1.2.2 Bezdrátové technologie . . . . .	18
1.3 Druhy komunikace . . . . .	20
1.4 Topologie sítí . . . . .	21
1.4.1 Logická topologie . . . . .	21
1.4.2 Fyzická topologie . . . . .	21
1.5 Přenosové technologie . . . . .	23
1.5.1 IEC 61850 . . . . .	23
1.5.2 TASE.2/ICCP . . . . .	25
1.5.3 IEC 60870-5-104 . . . . .	25
1.5.4 Distributed Network Protokol . . . . .	25
1.5.5 DLMS/COSEM . . . . .	27
1.6 Výběr kvalitativních parametrů komunikace . . . . .	29
<b>2 Simulační nástroje</b>	<b>31</b>
2.1 Network simulator 2/Network simulator 3 . . . . .	31
2.2 Riverbed Modeler . . . . .	31
2.3 Objective Modular Network Testbed in C++ . . . . .	31
2.4 Porovnání simulačních nástrojů . . . . .	32
<b>3 SCADA v OMNeT++</b>	<b>33</b>
3.1 Prozkoumané frameworky . . . . .	33
3.2 Instalace vývojového prostředí . . . . .	33
3.3 Prvky SCADA v OMNeT++ . . . . .	36
3.4 Testovací simulace . . . . .	37
3.5 Testování simulace . . . . .	43
3.6 Reporty ze simulace a přístup do ní . . . . .	48
<b>4 Závěr</b>	<b>52</b>
<b>Literatura</b>	<b>53</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>57</b>



<b>Seznam příloh</b>	<b>59</b>
<b>A Soubor norem pro IEC 61850</b>	<b>60</b>
<b>B Soubor norem pro TASE.2/ICCP</b>	<b>61</b>
<b>C Obsah přiloženého DVD disku</b>	<b>62</b>
C.1 Elektronická verze diplomové práce . . . . .	62
C.2 Ubuntu 14.04 s nainstalovaným OMNeT++ . . . . .	62
C.3 Simulace . . . . .	62
C.4 Instalační soubory . . . . .	62

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	IEC 61850 fyzický model . . . . .	24
1.2	DNP3 model master - slave . . . . .	26
1.3	DLMS/COSEM komunikační profily . . . . .	28
3.1	Schéma zapojení . . . . .	39
3.2	Nastavení alarmové hodnoty . . . . .	43
3.3	Přijetí alarmové zprávy . . . . .	43
3.4	Jednosměrné zpoždění SMV zprávy . . . . .	45
3.5	Jednosměrné zpoždění GOOSE zprávy . . . . .	46
3.6	Porovnání jednosměrného zpoždění u SMV a GOOSE zpráv v rámci jednoho přepínače . . . . .	47
3.7	Porovnání jednosměrného zpoždění u SMV a GOOSE zpráv za použití tří přepínačů . . . . .	47
3.8	Porovnání jednosměrného zpoždění u SMV a GOOSE zpráv za použití pěti přepínačů . . . . .	48
3.9	Porovnání jednosměrného zpoždění u SMV a GOOSE zpráv za použití deseti přepínačů . . . . .	49
3.10	Ztrátovost paketů . . . . .	49
3.11	Přijetí alarmové zprávy . . . . .	51

# SEZNAM TABULEK

1.1	Základní dělení strukturované kabeláže . . . . .	17
1.2	Základní dělení podle IEEE standardů . . . . .	18
1.3	Využití pásem u 4G sítí v Evropě . . . . .	20
1.4	Standard DLMS/COSEM za pomoci IEC 62056 standardu . . . . .	27
2.1	Porovnání NS2/NS3, OMNeT++ a Riverbed Modeleru . . . . .	32
3.1	Nastavení rozhraní Pc . . . . .	40
3.2	Nastavení rozhraní Inter . . . . .	41
3.3	Nastavení rozhraní Com . . . . .	42
3.4	Nastavení rozhraní Mu . . . . .	42
3.5	Jednosměrné zpoždění SMV zprávy . . . . .	44
3.6	Jednosměrné zpoždění GOOSE zprávy . . . . .	45
3.7	Ztrátovost paketů . . . . .	48

# ÚVOD

Operační technologie jsou v dnešní době velice diskutovanou technologií a v budoucnosti budou ještě více kvůli širokým možnostem nasazení. Využití mají především v průmyslu, v dopravě a ve městech. S tím souvisí převážně komunikace stroj - stroj, kdy probíhá komunikace převážně mezi zařízeními bez nutnosti zásahu člověka a následně komunikace typu stroj - člověk. Slouží k řízení pracovních procesů, sběru, analýze a vyhodnocování dat. Nesmí být ani opomenuta komunikace typu člověk - stroj a člověk - člověk. Komunikace v poslední době probíhá hlavně pomocí nízkovýkonových zařízení a tím roste nutnost nasazování nových komunikačních protokolů a technologií.

Cílem této práce je seznámení se s technologií operační technologie, především se systémem dispečerského řízení a sběru dat, simulačním prostředím programu NS2/NS3, Riverbed Modeler a OMNeT++ a možnostmi nasazení protokolů IEC 61850,

Tase.2/ICCP, IEC 60870-5-104, DNP3 a DLMS/COSEM. Simulační prostředí bude jednoduše upravitelné (jednoduchá integrace nových protokolů), škálovatelné (jednoduchá úprava komunikačních scénářů, množství účastníků, aj.) a modulární (jednoduchá výměna bloků, implementace komunikačních protokolů aj.).

Hlavním přínosem této práce je rešerše simulačních prostředí NS2/NS3, Riverbed Modeler a OMNeT++. Rešerše frameworků pro protokoly IEC 61850, Tase.2/ICCP, IEC 60870-5-104, DNP3 a DLMS/COSEM ve vybraném programu a jejich implementace.

Tato práce je rozdělena do tří kapitol. V kapitole 1 je popsána problematika operačních technologií, která je dále rozdělena na části internetu věcí, chytré domy, chytré továrny a města. Také je zde popsán Průmysl 4.0 a dispečerské řízení a sběr dat. Dále komunikační technologie, které jsou rozděleny na kabelové technologie, bezdrátové technologie a protokoly pro dispečerské řízení a sběr dat, kterými jsou: IEC 61850, Tase.2/ICCP, IEC 60870-5-104, DNP3 a DLMS/COSEM. V části zabývající se kabelovou technologií je popsáno PLC, optické a metalické spojení. Bezdrátové technologie jsou dále rozděleny do částí podle dosahu, následně jsou probrány technologie Wi-Fi, Wireless M-Bus a celulární sítě. Následně jsou zde popsány parametry, které nám říkají informace o kvalitě spojení jako jsou RSSI, SNR, ztrátovost, šířka pásma, bitová chybovost, zpoždění a Jitter. V kapitole 2 jsou popsány simulační programy NS2/NS3, Riverbed Modeler a OMNeT++.

V kapitole 3 bude zprovozněno simulační prostředí vybraného prostředí OMNeT++, do kterého budou následně implementovány frameworky<sup>1</sup> INET, který má podporu pro síťový provoz a INET MANET, který obsahoval částečnou podporu

---

<sup>1</sup>Je softwarová podpora, která slouží pro vývoj v daném jazyce a prostředí.

pro IEC 61850 a za jejich pomoci bude vytvořena simulace podle normy IEC 61850. Na té budou následně odměřeny hodnoty jednosměrného zpoždění a ztrátovosti paketů v závislosti na narůstajícím provozu sítě. Nejdříve bude odměřen provoz sítě, kdy zařízení Pc a Mu budou připojeny přes jeden přepínač. Další měření proběhne přes více přepínačů.

Je mnoho prací zabývajících se simulačními nástroji sítě nebo rozbořem protokolu pro operační technologie, ale publikace, která toto spojí a implementuje protokoly do simulačního prostředí je cílem této práce.

# 1 OPERAČNÍ TECHNOLOGIE

OT (operační technologie) je jeden z fenoménů dnešní doby, můžeme ho především najít v průmyslovém využití. Slouží k oddělení od klasického IT (informační technologie), ač s nimi má mnoho společného. Operační technologie slouží k nasazení počítačů ke sledování a řízení stavu systému například v elektrárnách, výrobě a další. Dále jsou zde nasazeny různé snímače a senzory. I když by tyto technologie mohly většinou využívat stejné přenosové medium, tak většinou tomu tak není. Hlavní rozdíly oproti informačním technologiím jsou:

- OT nepožaduje vysokou rychlost přenosu,
- OT neklade tak velký důraz na bezpečnost a důvěryhodnost dat,
- aktualizace systému nejsou tak časté jak v IT.

S tímto úzce souvisí IoT (Internet věcí - Internet of Things). Je rychle se rozvíjející oblastí informačních a operačních technologií, ty slouží ke komunikaci a kontrole předmětů, které jsou využívány v běžném životě. Zařízení mezi sebou mohou být propojena pomocí internetu, ale nemusí tomu být jenom tak, stačí když zařízení budou propojena do jakékoliv lokální sítě, ve které spolu budou moci komunikovat. Jako věc je v tomto případě brán jakýkoliv neživý objekt, jak fyzický, tak virtuální, který obsahuje elektroniku, software a senzory, pomocí kterých sbírá potřebné informace, ty následně vyhodnocuje a sdílí s ostatními věcmi v síti. Ty poté podle potřebných dat mohou vykonávat určitou aktivitu. To pro nás znamená, že čím více bude zařízení, tím více bude poskytnutých dat o reálném světě, tím budeme mít více dat k vyhodnocení a tím více znalostí bude možné aplikovat [1, 2].

Hlavními požadavky na IoT jsou [2]:

- sběr dat/informací/znalostí,
- uložení dat/informací/znalostí,
- analýza dat/informací/znalostí,
- sdílení výsledků,
- bezpečnost.

Dále se v operačních technologiích využívají Inteligentní sítě, protože čím dál tím víc dochází k většímu nasazování nepředpověditelných zdrojů elektrické energie, jako jsou solární a větrné elektrárny, je nutné zvládat čím dál větší špičkové odběry a zároveň umět uskladnit přebytečnou energii. V dnešní době se energetika vydává směrem decentralizace, daleko větší digitalizace a cestou autonomních ostrovů, které budou umět fungovat nezávisle. Cílem Inteligentní sítě je, aby všechny objekty pomocí automatizovaného energetického řídicího systému vzájemně komunikovaly, regulovaly svoje energetické nároky, uskladňovaly nevyužitou energii a dodávaly vlastní vyprodukovanou energii do rozvodné sítě. Předpokladem je velké nasazení digitálních komponent, které budou mít za úkol sběr a digitalizaci dat, obousměrnou komunikaci

mezi odběrným místem a řídicím datovým centrem na straně distribuční soustavy. Díky obousměrné komunikaci je možné velice efektivní nasazování obnovitelných zdrojů a řízení spotřeby [3].

V operačních technologiích se setkáváme s několika druhy komunikací, jako jsou:

**Komunikace člověk - člověk** Komunikace je vždy mezi člověkem a člověkem, může probíhat přímo mezi lidmi, dopisem nebo prostřednictvím nějakého zařízení. Jako tato komunikace se považuje například telefonování.

**Komunikace člověk - stroj** Komunikace probíhá mezi člověkem a strojem. Člověk v tomto případě používá stroj pro řízení a automatizaci výrobních procesů. Během těchto procesů dochází k situacím, které nejsou ve všech případech řádně ošetřeny, nebo dojde k nedostatku vstupních informací a v tomto případě musí převzít ovládání stroje člověk [4].

**Komunikace stroj - člověk** Komunikace probíhá mezi strojem a člověkem. Stroj v tomto případě automaticky informuje člověka o nějakých informacích jako je například automatické rozesílání reklamy. Případně elektronické zabezpečovací systémy, které informují člověka o případném narušení systému.

**Komunikace stroj - stroj** V dnešní době roste trend využívání zařízení, která mohou pracovat samostatně. Aby byl využit plně potenciál těchto zařízení, musí být připojeny do sítě, převážně do sítě internet nebo do lokální sítě, ve které zařízení mezi sebou komunikují. Takto začaly vznikat nové směry v komunikacích embedded zařízení. Komunikace stroj - stroj je považována za předchůdce IoT. Komunikace stroj - stroj byla obvykle zapojována jako bod - bod, kdežto zařízení IoT se zapojují do standardní IP (Internet Protocol) sítě [4, 5].

Nasazení operačních technologií a IoT najdeme už skoro kdekoliv. Proto se dále člení podle jeho využití.

**Chytré domy** Pro zvýšení pohodlí lidí, snížení emisí a úspory elektrické energie je žádoucí rozvíjet IoT v domácnostech. Sem se zejména řadí dálkové ovládání spotřebičů, ovládání spotřebičů různými návaznostmi, elektronické zabezpečovací a požární systémy z důvodů větší bezpečnosti. Monitorování spotřeby elektrické energie a vody.

**Chytrá města** Z důvodu velké koncentrace lidí do měst, která stále stoupá, je vhodné rozvíjet i toto odvětví. Mezi chytrá města se například řadí Hamburg, Nice, Písek [2]. Od chytrých měst se očekává výskyt chytrých budov, které šetří energie inteligentním topením a osvětlením. Město má inteligentní silnice, poskytuje informace a varovné zprávy, informuje o klimatických podmínkách, nehodách na silnici a objízdných trasách, které mají za následek snížení emisí, volných parkovacích místech. Má také inteligentní veřejné osvětlení, které reaguje na přítomnost objektů a na klimatické podmínky. Má detekci zaplnění

kontejnerů, což má za následek optimalizovaný svoz odpadů [6].

**Chytré továrny** Průmyslový Internet věcí je založen na komunikaci, kde stroje komunikují sami mezi sebou, bez nutnosti zapojit lidský faktor. Využívá se zde možnost ukládání a analýzy dat z důvodů efektivnějšího využívání pracovních zdrojů, snížení pracovních nákladů. Využití je především v průmyslové automatizaci a zdravotnictví.

## 1.1 Dispečerské řízení a sběr dat

Se vznikem Průmyslu 4.0, u jehož vzniku stála německá vláda, která plánuje každoročně investovat do transformace průmyslu 40 bilionů € a to až do roku 2020. Jedná se vlastně o čtvrtou průmyslovou revoluci, kde jde o to, že v továrnách by měli přestat pracovat lidé a vše si budou řídit stroje samy [7]. Vzhledem k těmto skutečnostem vydalo ministerstvo průmyslu a obchodu v září 2015 Národní iniciativu Průmysl 4.0, podle které bude revoluce příležitostí pro konkurenceschopnost českých firem a České republiky vůbec.

Průmysl 4.0 má tyto základní pilíře [8]:

- kyber-fyzikální systémy<sup>1</sup>,
- Internet věcí,
- Internet služeb,
- digitální ekonomika.

Z výše zmíněných důvodů je stále více a více důležitější vizualizace, sběr dat a jejich vyhodnocování, aby bylo možné zjednodušit kontrolu nad řízením. Za tímto účelem byla navržena technologie SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), která má za účel informace nejen shromažďovat, ale také má na starost vzdálenou regulaci a řízení a měla by prostupovat až do řízení celého podniku. Z důvodů modernizace všech odvětví SCADA zasahuje i do nevýrobních procesů, například do řízení a regulace rodinných domů, továren, elektráren a vodárenství [9].

Mezi základní prvky SCADA patří [9]:

**Vstupně - výstupní hardware** Je rozhraní, které je schopno přijímat informace z okolí a předávat je dále do systému. Jedná se tedy o senzory, snímače, čidla.

**Rozhraní pro komunikaci člověk - stroj** Je tak zvaný HMI (human machine interface), který tvoří rozhraní pro komunikaci stroje s člověkem. Může to být pomocí vestavných displejů na strojích nebo pomocí aplikace na počítači nebo jiném zobrazovacím zařízení. Pokaždé se jedná o aplikaci, která zobrazuje operátorovi informace o stavu daného zařízení [10].

---

<sup>1</sup>Systém, který se skládá z fyzických zařízení řízených počítačovými algoritmy.



**Komunikace** V technologii SCADA je komunikace velice rozličná, má mnoho druhů technologií, sběrnic, protokolů a typů komunikace. Proto je podrobněji roze-psána v podkapitole 1.2.

**Servery** Servery ve SCADA systému slouží pro propojení softwarových aplikací s hardwarem pro řízení technologií. Většinou se jedná o OPC (OLE for Process Control) servery. OPC je otevřený standard. OPC servery mají za úkol nepřetržité získávání dat z připojených hardwarových zařízení. Metody získávání dat jsou nezávislé, nezáleží na typu připojeného vstupně - výstupního zařízení a na druhu zobrazovací aplikace [9].

## 1.2 Komunikační technologie

Komunikační technologie jsou děleny z pohledu možností přenosu dat. Data můžeme přenášet po metalickém mediu, optickém kabelu nebo využít bezdrátový přenos. Proto jsou děleny na kabelové technologie a bezdrátové technologie.

### 1.2.1 Kabelové technologie

Využívají pro přenos signálu fyzické médium. Může to být elektrické vedení, metalické kabely nebo optická vlákna.

#### Přenos dat po elektrickém vedení

PLC (Power-line communication) je moderní technologie přenosu informací po elektrickém vedení. Pro přenos je možné využít jak vedení nízkého napětí, tak vedení vysokého napětí. Velkou výhodou PLC je jednoduchost jeho nasazení, nepotřebuje žádné další kabelové rozvody, jelikož pro přenos využívá kabelové rozvody elektrické sítě [11].

Základní dělení PLC je [11]:

**úzkopásmové** využívá frekvenční pásmo 3 – 500 kHz, přenosové rychlosti jsou v řádu stovek kb/s a dosah je 1 – 2 km.

**širokopásmové** využívá frekvenční pásmo 1,6 – 30 MHz, přenosové rychlosti jsou v řádu Mb/s a dosah je v řádu stovek metrů.

#### Optické kabely

Pro přenos dat v optickém vlákne je využíván odraz světelného paprsku. V optické soustavě se využívá rozsah infračerveného záření v rozmezí 800 – 1600 nm. Jako zdroj světla se využívají laserové a LED (Light Emitting Diode) diody. Vlákno se skládá z jádra, pláště, vnitřní a sekundární ochrany. Jádro je vyrobeno ze skla nebo

plastu. Plášť je tenká vrstva skla nebo plastu a obklopuje jádro. Jelikož má jiný index lomu, tak dochází k vnitřnímu odrazu šířeného paprsku. Primární ochrana slouží ke krytí před vlhkostí a zvyšuje pevnost vlákna. Sekundární ochrana slouží k ochraně před poškozením a mechanickým namáháním [12].

Základní dělení optických vláken je na jednovláková vlákna, kde průměr jádra je 9  $\mu\text{m}$  a průměr pláště 125  $\mu\text{m}$ , využívá vlnové délky 850 nm a 1300 nm a mnohavláková vlákna, kde průměr jádra je 50 nebo 62,5  $\mu\text{m}$  a průměr pláště 125  $\mu\text{m}$ , využívá vlnové délky 1310 nm a 1550 nm.

## Metalické kabely

Pro přenos dat na metalických kabelech je využíván elektrický potenciál. Nejčastěji se dnes setkáme s kabelem typu kroucená dvoulinka, je tvořena čtyřmi páry kabelů, které jsou po celé délce pravidelným způsobem zkroucené. Dají se využít pro přenos na vzdálenosti do 100 metrů bez nutnosti využití aktivního prvku.

Tab. 1.1: Základní dělení strukturované kabeláže [13].

Kategorie	Max. přenosová rychlost [Mb/s]	Šířka přenosového pásma [MHz]
3	10	16
4	20	20
5	100	100
5E	1000	100
6	1000	250
6A	10000	500
7	10000	600
7A	10000	1000
8	10000	2000

Dále se v tomto oboru setkáváme s komunikací po sériovém rozhraní typu RS (Recommended Standard) 232, RS 485.

**RS 232** Jde o dvojlinku, která je reprezentována napětovými úrovněmi vzhledem k zemi, tedy každý signál jde po jednom vodiči a mají společný zemní vodič, vůči kterému jsou napětové úrovně vztaženy. Protože mají signálové vodiče společný zemní vodič, je délka vodičů omezena na 15 metrů [14].

**RS 485** V případě RS 485 se jedná o kroucenou dvojlinku, která se vyskytuje ve dvou variantách. První varianta využívá ke komunikaci jeden pár vodičů a proto je potřeba zajistit, aby vysílač věděl, kdy může komunikovat. Ve druhém případě se

jedná o variantu, kdy jsou ke komunikaci použity dva páry a komunikace je vedena v každém směru zvlášť. RS 485 může mít délku vodičů až 1,2 km [15].

### 1.2.2 Bezdrátové technologie

Bezdrátová komunikace se dělí podle dosahu na sítě krátkého dosahu, kde zařízení mají dosah desítek metrů. Jejich hlavní výhodou je malá spotřeba, z důvodu nízkého vysílacího výkonu, slouží k propojení malých zařízení. Dále sítě středního dosahu a sítě dlouhého dosahu, kde zařízení mají dosah stovky metrů až několik kilometrů. Slouží k propojení zařízení, která jsou propojena přístupovým bodem.

#### Středního dosahu

**Wi-Fi** Technologie Wi-Fi se vztahuje k několika standardům 802.11. Vznik technologie byl v roce 1997. Všechny Wi-Fi standardy komunikují v nelicencovaném pásmu, využívají technologii rozprostřeného spektra.

Tab. 1.2: Základní dělení podle IEEE standardů [16, 17].

Standart IEEE	Max. přenosová rychlost [Mb/s]	Pracovní pásmo [GHz]
IEEE802.11a	54	5
IEEE802.11b	11	2,4
IEEE802.11g	54	2,4
IEEE802.11n	600	2,4 a 5
IEEE802.11ac	1000	5
IEEE802.11ah	347	0,9, 2,4 a 5

**Wireless M-Bus** Wireless M-Bus vychází se svého předchůdce drátové varianty M-Bus, který měl být specializovaným standardem pro vzdálená měření a sběr informací z měřičů. Z důvodů, že v dnešní době začínají bezdrátová zařízení vytlačovat svoje kabelové varianty, vznikla v roce 2005 specifikace Wireless M-Bus [18, 19].

**Režimy rádiového přenosu** Wireless M-Bus definuje několik režimů označených jako S, T a R2, které mají několik pod-režimů.

**Režim S** Režim S označuje stacionární režim, slouží jak k jednosměrné, tak k obousměrné komunikaci. Využívá pásmo 868,0 MHz až 868,6 MHz. Měřicí zařízení odesílají data jen několikrát denně. Režim S má několik pod-režimů. Pod-režim S1

slouží k jednosměrné komunikaci mezi statickým měřičem a statickým koncentrátorem. Pod-režim S1-m slouží k jednosměrné komunikaci mezi statickým měřičem a mobilním koncentrátorem. Pod-režim S2 je určený ke komunikaci se vždy zapnutým přijímačem nebo synchronizovaným přijímačem a nemusí být použita budící zpráva, jak u předchozích pod-režimů [18, 19].

**Režim T** Režim T označuje režim častého vysílání, slouží jak k jednosměrné, tak k obousměrné komunikaci. Využívá pásmo 868,0 MHz až 869,2 MHz. Měřicí zařízení odesílají data v rádech sekund a jsou velmi krátká. Režim T má několik pod-režimů. Pod-režim T slouží k jednosměrné komunikaci mezi měřičem a koncentrátorem, zpráva obsahuje pouze informaci o daném měřiči a odesílanou naměřenou hodnotu. Pod-režim T2 je určený k obousměrné komunikaci. Měřič odešle zprávu s informací o sobě, pokud dostane potvrzení, naváže se obousměrná komunikace [18, 19].

**Režim R2** Režim R2 označuje režim častého vysílání, slouží jak k jednosměrné, tak k obousměrné komunikaci. Využívá pásmo 868,0 MHz až 868,6 MHz. Měřicí zařízení odesílají data v rádech sekund a jsou velmi krátká, ale jsou odesílána ve stejném intervalu. Režim R2 po obdržení budící zprávy od mobilní stanice si aktivuje vícekanálový režim, který umožňuje příjem dat od více měřičů současně [18, 19].

## Dlouhého dosahu

**Celulární sítě** Jsou sítě, které ke komunikaci potřebují množství základových stanic, které se geodeticky vzájemně překrývají.

**1G** Je první generace bezdrátové telefonní technologie mobilního přenosu, byl představen v 80. letech. Využívá převážně dva standardy a to NMT (Nordic Mobile Telephone) a AMPS (Advanced Mobile Phone System).

**2G** Jedná se o digitální přenos, který dokáže přenášet data, SMS, digitální hlasový hovor a další pomocná data. Technologie jsou rozděleny podle typu multiplexování do standardů:

- TDMA - GSM, IDEN, IS-136, PDC,
- CDMA - IS-95.

**3G** Zkratka označuje mobilní zařízení a sítě, které vyhovují standardu International Mobile Telecommunications-2000. Standard umožňuje videohovory a mobilní televizi s rychlostí alespoň 200 kb/s. Rozšíření standardu umožňuje přenosy až rychlostí jednotek Mb/s. IMT-2000 definuje tyto standardy:

- W-CDMA,
- CDMA2000,
- TD-CDMA/TD-SCDMA,
- DECT,
- UWC-136.

**4G** Teoretická rychlost stahování je 172,8 Mb/s a odesílání 57 Mb/s. V Evropě se používají následující pásma 1.3:

Tab. 1.3: Využití pásem u 4G sítí v Evropě.

Pásmo	Frekvence [MHz]	Pásmo	Frekvence [MHz]
1	2100	31	450
3	1800	32	1500
7	2600	38	2600
8	900	40	2300
20	800	42	3500
22	3500	43	3700
28	700		

**5G** Pro sítě 5G aktuálně neexistuje žádný standard pro Českou republiku. V Americe byly schváleny frekvence zahrnující 28 GHz, 37 GHz a 39 GHz pásma. Výhodou 5G má být především:

- datové přenosy desítek Mb/s pro desítky tisíc uživatelů,
- datové přenosy stovek Mb/s pro městské oblasti,
- datové přenosy v Gb/s pro desítky zařízení na jednom poschodí.

## 1.3 Druhy komunikace

**Master - Slave** Master - Slave je model komunikace, kdy jedno zařízení kontroluje jedno nebo více zařízení, která jsou zapojena do systému. V systémech SCADA zastávají roli masteru serverová zařízení, která mají za úkol sběr dat od vstupně - výstupních zařízení, která v tuto dobu zastávají roli zařízení slave [20].

**Klient - server** Model komunikace klient - server, se využívá za předpokladu, že jedno zařízení žádá od jiného zařízení informace. Jde o podobný model jako Master - Slave, ale s tím rozdílem, že komunikaci navazuje klient a ne Master. Ve SCADA systémech zastávají roli serveru serverová zařízení, která mají za úkol poskytování

a uchovávání dat od vstupně - výstupních zařízení, která v tuto dobu zastávají roli klienta [20].

**Peer to peer** Peer to peer je model komunikace, kdy všechna zařízení v síti mohou zastávat jak roli klienta, tak roli serveru. Ve SCADA systémech tímto způsobem mohou komunikovat přímo vstupně - výstupní zařízení mezi sebou nebo přímo servery mezi sebou.

## 1.4 Topologie sítí

Topologie sítí popisuje, jak jsou uspořádány prvky (přepínače, koncová zařízení, routery) v síti. Topologii dělíme na logickou a fyzickou topologii.

### 1.4.1 Logická topologie

Nám popisuje, jakým způsobem se mohou data v síti šířit. Logická topologie nemusí být stejná jako fyzická topologie.

#### Sběrnice

Data se šíří naráz od vysílače ke všem ostatním stanicím. Hlavním představitelem této topologie je Ethernet. S nástupem přepínačů se počet rozesílaných zpráv velice omezil.

#### Kruh

V logické topologii se doručovaná data předávají v pevném pořadí od jedné stanice ke druhé. Stanice, které data náleží, si je ponechá a ostatní data ignoruje.

### 1.4.2 Fyzická topologie

#### Sběrnice

Všetchna zařízení jsou připojena na společném přenosovém mediu, kterým je koaxiální kabel. Na obou koncích přenosové trasy musí být terminátor, který má na starost zamezení vrácení přenášené informace, zařízení jsou připojena na sběrnici pomocí T spojky.

#### Výhody

- Jednoduchá realizace a připojení dalších zařízení,
- nízké náklady na realizaci.

### **Nevýhody**

- Poškození kabelové trasy znamená nefunkčnost celé sítě,
- omezený počet stanic a délka kabelové trasy,
- malé přenosové rychlosti,
- pouze jedna přenášená informace v jeden okamžik,
- vysílaná informace je k dispozici každému zařízení v síti.

### **Kruh**

V této topologii je každé zařízení vzájemně propojeno se dvěma sousedními zařízeními.

### **Výhody**

- Jednoduchá realizace a připojení dalších zařízení,
- nízké náklady na realizaci.

### **Nevýhody**

- Poškození kabelové trasy nebo koncového zařízení znamená nefunkčnost celé sítě,
- malé přenosové rychlosti,
- pouze jedna přenášená informace v jeden okamžik,
- vysílaná informace je k dispozici každému zařízení v síti.

### **Hvězda**

Tato topologie má centrální řídicí prvek, který má na starost propojení jednotlivých koncových zařízení. Centrální prvek může být přepínač, hub nebo router. V praxi se často používá takzvaná stromová topologie, ve které je propojeno více hvězd mezi sebou. V tomto případě se využívá několik redundantních zařízení pro zajištění provozu na vyšších vrstvách.

### **Výhody**

- Selhání jednoho koncového zařízení, zůstává funkční zbytek sítě,
- nedochází ke kolizím dat,
- snadné nastavení a rozšíření,
- snadné nalezení chyb.

### **Nevýhody**

- Vyšší spotřeba propojovacího materiálu,
- při selhání propojovacího zařízení dochází k poruše celé sítě.

## Smíšená

Jedná se o topologii, ve které je jeden uzel propojen s více sousedními uzly. Může se buď jednat o částečně propojenou síť, kdy některé uzly jsou přímo propojeny s několika jinými uzly, nebo o plně propojenou síť, kde je každý uzel propojen se všemi ostatními uzly.

## Výhody

- Přerušení jednoho spoje nezaviní kolaps celé sítě.

## Nevýhody

- Velké množství propojovacích spojů,
- obtížná instalace.

# 1.5 Přenosové technologie

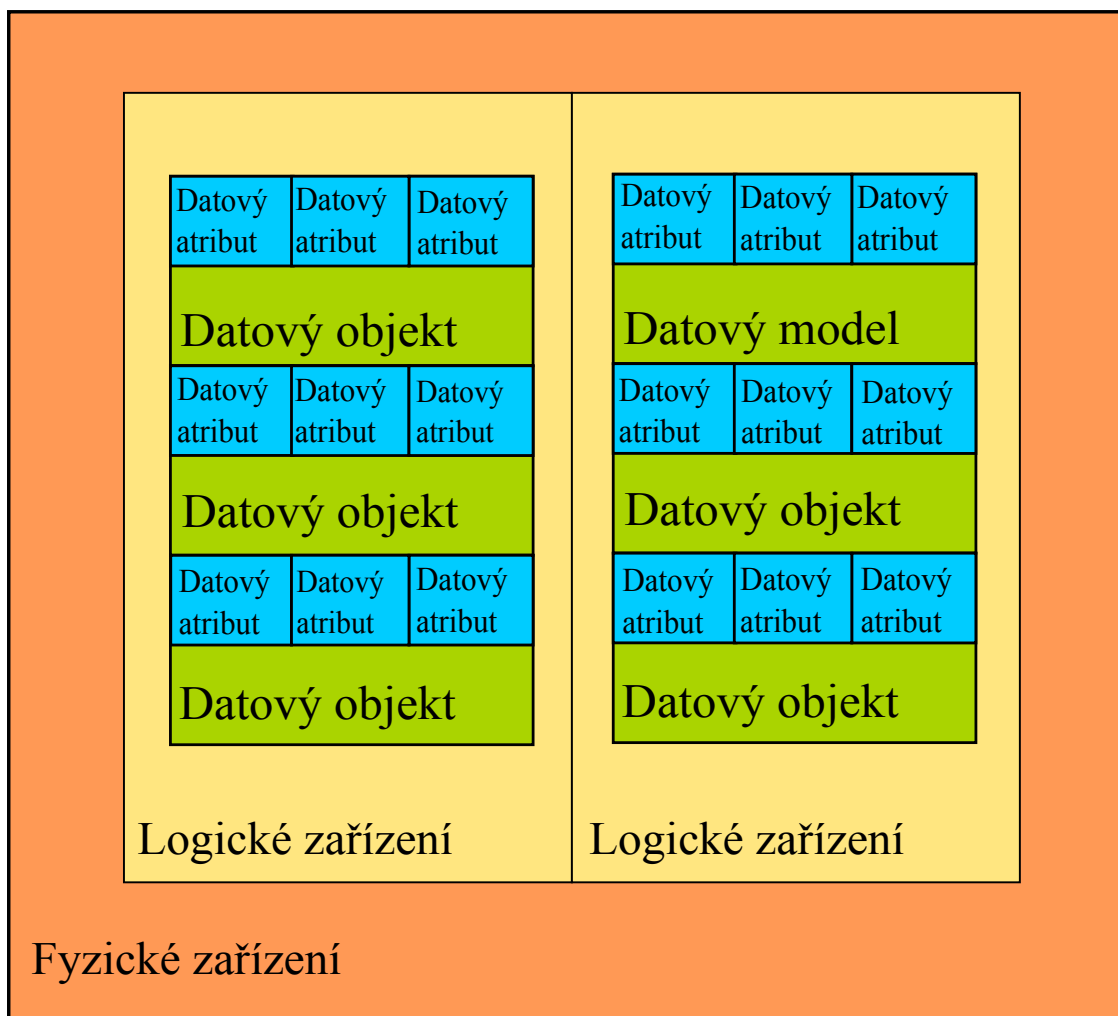
## 1.5.1 IEC 61850

Normy IEC (International Electrotechnical Commission's) 61850 nám říkají, jaká jsou pravidla pro komunikaci mezi zařízeními v rozvodnách. Obsahují standardy pro řídicí funkce a definice komunikačních protokolů. IEC 61850 je protokol, který vznikl ke zjednodušení komunikace zařízení v rozvodnách, jelikož umožňuje vytváření systémů, které obsahují zařízení od různých výrobců. Protokol nám nejen říká, jak komunikují zařízení uvnitř rozvodny, ale i jak probíhá komunikace mezi rozvodnami. Jelikož protokoly IEC 61850 vycházejí z Ethernetu, je možné využít mnoho známých nástrojů a zařízení komunikační infrastruktury, používaných v systémech podnikového řízení energetických závodů. Architektura komunikačního systému IEC 61850 je typu klient - server, upravená o možnost, že i klientská stanice může řídit přenos dat [21]. Seznam norem v příloze A.

**Fyzický model** Všechna data jsou organizována objektově orientovaným přístupem v ochranných terminálech. Tato vlastnost nám zaručuje trvale konzistentní stav, z důvodu nezávislosti na vlastní realizaci přístroje nebo protokolu. Je to z důvodu, že každý objekt v systému má jasně daný abstraktní model zobrazení.

Fyzické zařízení je určeno IP adresou a představuje ochranný kontejner. Logických zařízení může být ve fyzických zařízeních několik, jsou jejich podskupinou a jsou to skupiny zařízení s podobnými vlastnostmi. Každý logický uzel může obsahovat několik datových objektů. Datové objekty mohou být přijímány ostatními logickými uzly. Datové atributy zastupují nejnížší část modelů, například: logické stavy vypínačů, povelů a měřené hodnoty [22].





Obr. 1.1: IEC 61850 fyzický model.

GSSE (Generic Substation State Events) je generická stavová událost ústředny. Přenáší se prostřednictvím MMS za využití stavového seznamu. V tomto případě se nejedná o datový blok, ale jedná se o řetězec bitů [21].

GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events) je objektově orientovaná událost rozvodny. Na tuto komunikaci jsou kladeny přísné bezpečnostní a časové požadavky, na rozdíl od GSSE. Zařízení, která jsou registrována pro odběr zpráv, jsou zprávy odesílány v pevně daném časovém intervalu za pomoci multicastingu. Odesílaná zpráva je vytvořena a odeslána jako takzvaný data set [21].

SMV (Sampled Measured Values) je objektově orientovaná událost ze senzorních jednotek, které většinou komunikují přes sériovou linku nebo pomocí Ethernetu.

### 1.5.2 TASE.2/ICCP

Sada norem IEC 60870 nám říká, jaká jsou pravidla pro komunikaci mezi zařízeními v rozvodnách i mezi řídicími centry. Obsahuje standardy pro řídicí funkce a definice komunikačních protokolů. TASE2 (Telecontrol Application Service Element 2) a ICCP (Inter-Control Centre Communications Protocol) jsou definovány normou IEC 60870-6-1, která nám říká základní definice. Aplikační, prezentační a relační vrstvu nám popisuje norma IEC 60870-6-503. Transportní vrstva je implementována pomocí TCP/IP. Protokol TASE.2 je založen na MMS [23]. Seznam norem v příloze B.

ICCP je založen na principech klient/server. ICCP pracuje na aplikační vrstvě v modelu OSI. ICCP neposkytuje ověřování ani šifrování. Toto zajišťují protokoly na nižších vrstvách. ICCP k zajištění komunikace využívá bilaterální tabulky, které jsou uloženy jak na straně klienta, tak serveru. Bilaterální tabulky zajišťují úplnou kontrolu nad tím, co je pro každou stranu přístupné. Musí existovat odpovídající položky v serverových a klientských tabulkách, které poskytují přístup k datům a objektům [24].

### 1.5.3 IEC 60870-5-104

Norma IEC 60870-5-104 vychází z normy IEC 60870-5-101, která nám definuje síťový přístup s použitím standardních transportních profilů. IEC 60870-5-104 umožňuje komunikaci mezi řídicí stanicí a rozvodnou prostřednictvím sítě TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Protokol TCP se využívá na zabezpečené spojení s ověřením doručených dat.

IEC 60870-5-104 omezuje typy informací a konfigurační parametry definované v IEC 60870-5-101. Norma IEC 60870-5-104 nepodporuje krátká časová razítka, délka různých prvků adresy je nastavena na definovanou maximální hodnotu.

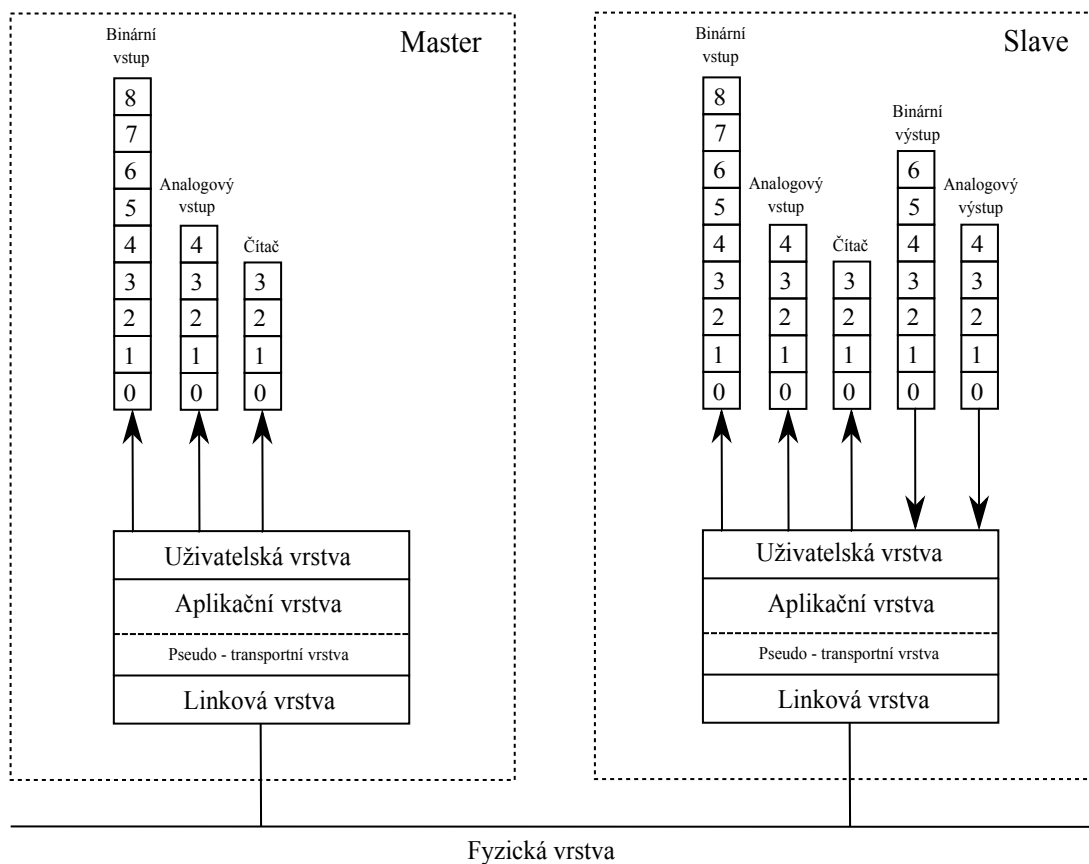
Kompatibilitu zařízení od různých dodavatelů zajišťuje soubor kompatibility, který je definovaný normou. Zde je uveden rozsah funkcí každého zařízení [25] [26].

### 1.5.4 Distributed Network Protokol

DNP verze 3 (Distributed Network Protokol) je sada protokolů, které se používají při průmyslové automatizaci. Slouží ke komunikaci mezi počítačovými stanicemi a hlavními stanicemi pro průmysl elektrických zařízení, využívá se také ve vodárenství, kanalizaci, dopravě, v ropném a plynárenském průmyslu.

Podporuje zjednodušený třívrstvý model navržený Mezinárodní elektrotechnickou komisí pro základní implementace. Podle IEC je to model EPA (Enhanced Performance Architecture). Nicméně DNP3 vytváří EPA přidáním čtvrté vrstvy pseudo

- transportní, která umožňuje segmentaci zprávy, místo použití sedmivrstvé architektury ISO/OSI (International Organization for Standardization/Open Systems Interconnection) [27].



Obr. 1.2: DNP3 model master - slave [28].

**Fyzická vrstva** Se především vztahuje na fyzické médium, po kterém protokol komunikuje. Zjišťuje také stav média a synchronizaci. Ke komunikaci nejčastěji využívá RS 232 a RS 485, ale použití Ethernetu není výjimkou.

**Linková vrstva** Zajišťuje logické spojení mezi vysílačem a přijímačem. Také slouží k detekci chyb přijatých rámců a k adresaci zdrojových a cílových zařízení.

**Pseudo - transportní vrstva** Provádí segmentaci zpráv aplikační vrstvy do rámců. Do každého rámce zprávy je přidán jeden bajt, který udává, zda rámec je první, nebo jiný v pořadí, případně se celý fragment aplikační vrstvy vešel do jednoho rámce.

**Aplikační vrstva** Má na starost formát zprávy a její služby. Také zajišťuje poskládání příchozích zpráv z pseudo - transportní vrstvy a zajišťuje prezentaci uživatelských dat [28].

### 1.5.5 DLMS/COSEM

DLMS (Distribution Line Message Specification) je sada otevřených standardů. Protokol pracuje na principu server - klient, který využívá služeb aplikační vrstvy. Tato vrstva poskytuje rozhraní pro COSEM (Companion Specification for Energy Metering).

DLMS/COSEM vychází se standardu IEC 62056, který DLMS upravuje za pomoci barevných knih, úprava je patrná z tabulky 1.4. Vychází z ISO/OSI modelu, avšak spojuje vrstvy do čtyř a to: aplikační, linková, transportní a fyzická [29].

Tab. 1.4: Standard DLMS/COSEM za pomoci IEC 62056 standardu [29].

Modrá kniha	IEC 62056-61 IEC 62056-62	COSEM objektový model a identifikace objektu
Zelená kniha	IEC 62056-21 IEC 62056-42 IEC 62056-46 IEC 62056-47 IEC 62056-53	Architektura a protokol transportního modelu
Žlutá kniha		Zkoušky shody
Bílá kniha		Výklad zvláštních výrazů DLMS/COSEM

**Fyzická vrstva** Se především vztahuje na fyzické médium, po kterém protokol komunikuje. Zjišťuje také stav média a synchronizaci.

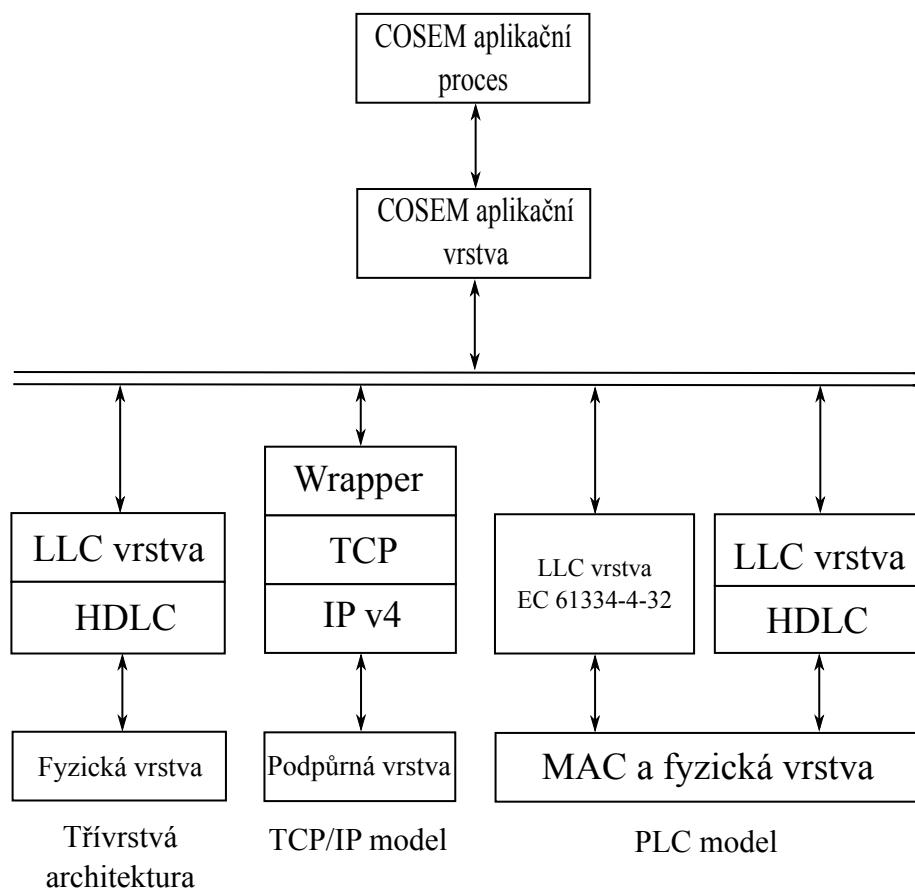
**Linková vrstva** Protokol linkové vrstvy může využívat mnoho standardů, nejčastěji využívá HLDC (High - Level Data Link Control) nebo Ethernet. Zajišťuje logické spojení mezi vysílačem a přijímačem. Také slouží k detekci chyb přijatých rámců a k adresaci zdrojových a cílových zařízení.

**Transportní vrstva** Vrstva využívá TCP a UDP nebo může využívat rozhraní COSEM, to pak obsahuje ještě podvrstvu Wrapper, která má za úkol upravit služby ISO/OSI na převod mezi COSEM, TCP a nebo UDP.

**Aplikační vrstva** Má na starost navazování a ukončování spojení, také má na starost formát zprávy, její služby a výměnu dat. Aplikační vrstva v rozhraní COSEM bere měřicí zařízení jako logické jednotky a její data jsou definována jako sada několika aplikačních procesů.

Protokol DLMS/COSEM standardně využívá tři komunikační profily a to [29]:

- profil založený na TCP/IP, pomocí Ethernet, ISDN, GPRS, UMTS, PSTN/-GSM PPP atd.,
- za pomoci třívrstvého modelu, kde fyzickou vrstvu zastává optické nebo metalické médium, dále obsahuje COSEM aplikační vrstvu a linkovou vrstvu za HLDC,
- poslední možností je také třívrstvý model za pomoci PLC.



Obr. 1.3: DLMS/COSEM komunikační profily [29].

## 1.6 Výběr kvalitativních parametrů komunikace

**RSSI - Síla přijímaného signálu** RSSI je hodnota fyzické podvrstvy energie přijímané anténou sloužící pro příjem aktuální datové jednotky prezentační vrstvy. Tato metoda je pravděpodobně nejčastější technikou, která slouží pro určení vzdálenosti bezdrátových zařízení. Podle standardu IEEE 802.11 je RSSI volitelný parametr s hodnotami 0 až RSSI Max. Různí výrobci udávají různá rozpětí hodnot RSSI pro svoje zařízení. Všeobecný tvar rovnice RSSI [30]:

$n$  = PLE (ztrátovost prostředí)

$d$  = vzdálenost od vysílače

$A$  = síla přijímaného signálu na metr

$$RSSI = -10n \log_{10}(d) + A [dBm], \quad (1.1)$$

**SNR - Poměr signál k šumu** Poměr signál k šumu je měřítkem používaným ve vědě a technice, který porovnává úroveň požadovaného signálu s úrovní šumu v pozadí. Poměr signál k šumu je definován jako poměr výkonu signálu k výkonu šumu, často vyjádřený v decibelech. Poměr větší než 1:1 tedy větší než 0 dB signalizuje více signálu než okolního šumu. Obecná rovnice SNR [31]:

$P_{signál}$  = udává výkon žádoucího signálu na měřené trase

$P_{šum}$  = udává výkon šumu na měřené trase

$$SNR = 10 \log_{10}\left(\frac{P_{signál}}{P_{šum}}\right) [dB], \quad (1.2)$$

**Ztrátovost** Je chyba, při které se ztratí jeden nebo více paketů v počítačové síti. Ztrátu paketů může způsobit více okolností. Největší vliv mají tyto vlastnosti: zhoršená kvalita signálu, zahození paketu z důvodu zahlcení sítě, poškozené pakety zamítnuté během přenosu, selhání síťového hardwaru, selhání síťových ovladačů nebo běžného směrování. Procentuální rovnice ztrátovosti je:

$P_a$  = udává počet přijatých paketů

$P_s$  = udává počet odeslaných paketů

$$LR = \frac{P_a}{P_s} \cdot 100 [\%], \quad (1.3)$$

**Propustnost pásma** Je využitelný rozsah frekvenčního intervalu, ve kterém dochází k přenosu dat. Jedná se tedy o objem datových bloků, které dokáže přenosová cesta propustit během časového úseku.

**Bitová chybovost** Je poměrem chybně přijatých bitů ku celkovému počtu přijatých bitů za určitou dobu měření. Obecný tvar rovnice Bitové chybovosti je [32]:

$n_c$  = udává počet chybně přijatých bitů

$N_B$  = počet celkově přijatých bitů ve stejném intervalu

$$BER \approx \frac{n_c}{N_B} \quad (1.4)$$

**Zpoždění** Je čas, který uplyne od odeslání datagramu vysílací stanice po přijetí stanicí cílovou. Zahrnuje zpoždění v přenosové trase a na zařízeních, která jsou součástí přenosové trasy.

**RTT** Obousměrné zpoždění je doba, která uplyne od vyslání datagramu z jedné stanice na druhou a zpětná odpověď od druhé stanice zpět na první. RTT nám nezaručuje, že pro výpočet zpoždění je využita stejná cesta datagramů a tím pádem má každá cesta odlišné zpoždění.

**E2E delay** Je jednosměrné zpoždění, tedy doba, která uplyne od vyslání datagramu z jedné stanice po obdržení datagramu na stanici druhé.

**Jitter** Je rozdíl v intervalech mezi přijímanými pakety. Je to způsobeno tím, že díky zatížení sítě bývají pakety doručovány v odlišném pořadí. Rozptyl paketů bývá potlačen na straně klienta pomocí bufferu. Ve většině případů je využit buffer, který dynamicky přizpůsobuje svoji velikost.

## 2 SIMULAČNÍ NÁSTROJE

### 2.1 Network simulator 2/Network simulator 3

NS2 (Network simulator 2) a NS3 (Network simulator 3) jsou simulační síťové nástroje, které simulují chování a výkon mnoha síťových typů. Jsou multiplatformní, i když jejich zprovoznění na OS Windows není nejjednodušší. NS2/NS3 má více možností definice sítě. Můžeme zde použít předdefinované prvky sítě, jako jsou přepínače, routery, servery a propojit je za pomoci linek. Následně nastavit parametry komunikace. Další možností je možnost definice uzlů. Zde máme možnost vytvářet bloky kódů v jazyce C/C++ nebo skripty v jazyce Python. Knihovny NS jsou napsané v jazyce Python, které jsou následně převedeny do jazyka C++ pro lepší uživatelskou konfiguraci, které jsou po uživatelské úpravě opět přeloženy do jazyka Python pro použití jádra simulátoru [33].

### 2.2 Riverbed Modeler

Je simulační síťový nástroj dříve nazývaný OPNET, který simuluje chování a výkon mnoha síťových typů. Jedná se o multiplatformní síťový simulátor. Riverbed Modeler má více možností definice sítě. Můžeme zde použít předdefinované prvky sítě, jako jsou přepínače, routery, servery a propojit je za pomoci linek. Následně nastavit parametry komunikace. Další možností je možnost definice uzlů. Zde máme možnost vytvářet bloky kódů v jazyce C/C++. Následně bloky propojit a vytvořit si vlastní funkční uzel. Riverbed Modeler obsahuje spoustu vlastních datových typů a také funkcí, které nejsou modifikovatelné, protože se jedná přímo o funkce jádra simulačního programu [34].

### 2.3 Objective Modular Network Testbed in C++

OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++) je simulační síťový nástroj, který simuluje chování a výkon mnoha síťových typů. Jedná se o multiplatformní síťový simulátor. Základem každé topologie jsou uzly, ty jsou následně propojeny linkami. Funkcionalita uzlů se definuje pomocí jazyka C++. Definice parametrů modulů se definuje za pomoci jazyka NED.

Za pomoci jazyka NED se provádí [35]:

- definice kanálů,
- definice modulů,
- definice sítě,



- import modulů.

Všechny již vytvořené moduly se mohou volat i v jiném zapojení.

Při psaní kódu si musíme dávat pozor na rezervovaná slova jazyka NED. Rezervovaná slova jsou:

*import, channel, endchannel, simple, endsimple, module, endmodule, error, delay, datarate, const, parameters, gates, submodules, connections, gatesizes, if, for, do, endfor, network, endnetwork, nocheck, ref, ancestor, true, false, like, input, numeric, string, bool, char, xml a xmldoc*

Velkou výhodou simulátoru OMNeT++ je velké množství frameworků, které je možné importovat.

## 2.4 Porovnání simulačních nástrojů

V tabulce 2.1 je provedeno porovnání simulačních nástrojů z hlediska možností integrace protokolů.

Tab. 2.1: Porovnání NS2/NS3, OMNeT++ a Riverbed Modeleru.

	NS2/NS3	OMNeT++	Riverbed Modeler
Licence	Volná	Volná	Volná - nutnost registrace
Grafické prostředí pro vývoj	Ne	Ano	Ano
Vizualizace topologie sítě	Ano	Ano	Ano
Rozšiřitelnost dostupných protokolů	Ano	Ano	Ano
Nutná znalost programování	Ano	Ano	Ano
Možnost propojení do reálného prostředí	Ano	Ano	Ne

Z důvodu, že jedním z požadavků byla lehká upravitelnost a integrace dalších protokolů, tak z výběru byl zamítnut NS2/NS3, jelikož nemá vývojové grafické prostředí. Dále nebyla nalezena zmínka o možnosti propojení simulované sítě v Riverbed Modeleru do reálného prostředí, tak byl vybrán simulační nástroj OMNeT++.

## 3 SCADA V OMNET++

OMNeT++ byl vybrán pro práci z důvodu dobře zpracovaného grafického vývojového prostředí a možnosti grafické simulace výsledků. OMNeT++ jako takový neobsahuje žádné možnosti nasazení prvků ze systému SCADA, všechny by se musely tvořit od počátku. Toto neobsahují ani ostatní popsané simulační nástroje. Jako jediný ale obsahuje velké množství frameworků, které by mohly být vhodné pro nasazení k simulaci.

### 3.1 Prozkoumané frameworky

Frameworků vhodných pro tvorbu síťové komunikace je mnoho, ale pro protokoly SCADA systémů byl nalezen jen jeden framework INET MANET. Vytvoření SCADA zařízení a protokolů by v základním nastavení OMNeT++ bylo možné zrealizovat, ale bylo by to velmi časově náročné. Proto byly prozkoumány různé frameworky, i když každý byl vyvinut pro jinou verzi OMNeT++.

**INET** je open source framework pro simulaci jak bezdrátových, tak i klasických sítí. Je to nejrozšířenější framework a většina dalších z něj vychází. Obsahuje možnost implementace řady protokolů síťové i vyšších vrstev, neobsahuje pro nás potřebné protokoly, ale z důvodů návazností bude využit.

**MiXiM** je také open source framework, ale slouží pro simulaci mobilních, bezdrátových a senzorových sítí. Obsahuje také prvky, které jsou vhodné pro popis přenosového kanálu na fyzické vrstvě. Je to framework především pro sítě využívající bezdrátovou komunikaci. Tedy nebude využit.

**SCADA<sub>sim</sub>** je také open source framework, obsahuje protokol Modbus v návaznosti na INET framework.

**INET MANET** je také open source framework, je rozšíření frameworku INET, jedna z jeho distribucí od vývojáře Hécтора Leóna z University of Porto, obsahuje podporu pro protokol IEC 61850.

### 3.2 Instalace vývojového prostředí

Nejdříve bylo nutné nainstalovat virtuální prostředí pro instalaci optimální verze OMNeT++. Jako virtualizační nástroj byl vybrán Oracle VM VirtualBox, verze 6.0.6. V něm byl následně nainstalován operační systém Windows 7. Byl vybrán pro

jednodušší instalaci OMNeT++. Následně byl nainstalován OMNeT++ verze 4.6, jelikož v jeho verzi byl vyzkoušen potřebný INET MANET. Výběr operačního systému Windows se časem ukázal jako chybný krok, z důvodu potřeby pro tvorbu simulace za využití INET MANETu, bylo nutností využít starší verzi OMNeT++, která uměla využít *dll knihovny* o velikosti 65 536 záznamů a naše knihovna obsahovala záznamů více. Tento problém byl vyřešen až od verze 5.0 a v něm nebyl INET MANET otestován, tak se přešlo na operační systém Linux Ubuntu 14.04.

Všechny distribuce obsahují pouze zdrojové kódy a je proto nutné je před prvním spuštěním OMNeT++ zkompileovat. V prostředí Linuxu se vše provádí z terminálu. Nejdříve nainstalujeme potřebné balíčky pro provoz OMNeT++. Spustíme terminál a zadáme příkaz pro aktualizaci repozitářů:

```
sudo apt-get update
```

Následně provedeme instalaci balíčku souborů potřebných pro chod OMNeT++ verze 4.6:

```
sudo apt-get install build-essential gcc g++ bison flex perl tcl-dev  
tk-dev libxml2-dev zlib1g-dev default-jre doxygen graphviz libwebkitgtk-1.0-0  
openmpi-bin libopenmpi-dev libpcap-dev
```

Dále stáhneme OMNeT++ z oficiálních stránek a rozbalíme příkazem:

```
tar xvfz omnetpp-4.6-src.tgz
```

Tento příkaz nám rozbalí OMNeT++ do adresáře omnetpp-4.6. Následně do adresáře vstoupíme příkazem *cd* například:

```
cd /dev/omnetpp-4.6
```

Dále musíme zadat příkaz:

```
./configure
```

který nám sestaví konfigurační soubory pro prostředí. Následně musíme zadat cestu prostředí do souboru *~/.bashrc*, toto uděláme nejdříve zadáním do terminálu:

```
gedit ~/.bashrc
```

následně se nám otevře textový editor Gedit, ve kterém přidáme na konec souboru `~/.bashrc` následující text:

```
export PATH=$PATH:/home/omnet/dev/omnetpp-4.6/bin
```

Teď už můžeme sestavit OMNeT++ do spustitelné podoby zadáním příkazu:

```
make
```

Po sestavení je možné použít příkaz:

```
omnetpp
```

kterým se spouští vývojové prostředí. Po spuštění aplikace OMNeT++ jsme vyzváni k importování vzorových úloh a frameworku INET. Vzorové příklady si necháme naimportovat, abychom mohli ověřit funkci OMNeT++, ale framework ne, z důvodů dodržení potřebné verze k INET MANETu. Ze stránek INETu stáhneme verzi 2.5 a následně ji rozbalíme příkazem:

```
tar xvfz inet-2.5.0-src.tgz
```

Tento příkaz nám rozbalí INET do adresáře `inet`. Následně do adresáře vstoupíme příkazem `cd` například:

```
cd /dev/inet
```

Dále musíme zadat příkaz:

```
make makefiles
```

který nám vytvoří soubor `makefiles` pro sestavení prostředí INETu. Teď už můžeme sestavit INET do spustitelné podoby zadáním příkazu:

```
make
```

Následně spustíme OMNeT++ příkazem `omnetpp` a můžeme INET naimportovat. V prostředí OMNeT++ zvolíme: **File** → **Import** → **General** → **Existing Projects into Workspace**, kde vybereme adresář `/home/omnet/dev/inet` a zaškrtneme *Copy project into workspace*.

Dále stejným způsobem rozbalíme, nainstalujeme a importujeme INET MANET. Jako poslední věc nainstalujeme program Wireshark pro otevírání vytvořených \*.pcap souborů, toto uděláme příkazem:

```
sudo apt-get install wireshark
```

### 3.3 Prvky SCADA v OMNeT++

Po importování frameworku INET MANET se nám v prostředí OMNeT++ objeví další použitelná zařízení pro tvorbu sítě. Jsou zde na výběr jednoprvkové moduly, nebo moduly složené. Složené moduly se skládají z několika jednoduchých modulů, které jsou propojeny pomocí bran.

**Merging Unit** Merging Unit je zařízení, které umožňuje implementaci procesní sběrnice IEC 61850 převedením analogových signálů z běžných proudových transformátorů a transformátorů napětí na hodnoty uvedené v normě IEC 61850. Jedná se o složený modul, který se skládá z modulů: EtherMACFullDuplex, EtherAppSv a EtherEncap.

**Pc** Je zařízení, které shromažďuje informace od zařízení Merging Unit za pomoci SMV zpráv procesní sběrnice IEC 61850 převedením. Jedná se o složený modul, který se skládá z modulů: EtherMACFullDuplex, EtherAppSv, EtherEncap a EtherAppGoose.

**EtherMACFullDuplex** Jedná se o jednoprvkový modul. EtherMACFullDuplex je rozhraní, které podporuje plně duplexní provoz. Poskytuje ohromnou výhodu oproti klasickému rozhraní EtherMAC z frameworku INET z důvodu nastavování jen jedné trasy pro dané rozhraní. U rozhraní EtherMac frameworku INET se musí nastavovat cesty dvě. Rozhraní EtherMACFullDuplex může používat rychlosti 10 Mb/s, 100 Mb/s, 1 Gb/s, 10 Gb/s, 40 Gb/s a 100 Gb/s. EtherMACFullDuplex provádí přenos a příjem rámců. Podle adresy MAC rozhoduje, zda bude rámec přijat nebo zamítnut. Pokud je rámec zamítnut, bude zahozen, pokud přijat, bude předán rozhraní EtherEncap.

**EtherEncap** Je také jednoprvkový modul. Má na starost buď zapouzdření zprávy z vyšší vrstvy do ethernetového rámce a předání na rozhraní EtherMACFullDuplex. Nebo v opačném případě má na starost zbavení ethernetového rámce a předání vyššímu rozhraní.

**EtherAppSv** Je jednoduchý modul, který slouží ke generování a zpracování SMV řídicích zpráv. Pokud modul nemá generovat SMV zprávy, má být propojen s modulem EtherAppGoose.

**EtherAppGoose** Je jednoduchý modul, který slouží ke generování a zpracování GOOSE zpráv. Pokud modul nemá generovat SMV zprávy, má být propojen s modulem EtherAppGoose.

**Inter** Je víceprvkový modul složený z EtherMACFullDuplex, EtherEncap a EtherAppGoose. Jeho úkolem je reakce na GOOSE zprávy od modulu Pc.

**Com** Je víceprvkový modul složený z EtherMACFullDuplex, EtherEncap a EtherAppGoose. Jeho úkolem je reakce na GOOSE zprávy od modulu Pc.

**SCADA** Je víceprvkový modul složený z EtherMACFullDuplex, EtherEncap, EtherQoSQueue a EtherTrafGen. SCADA je účastník komunikace, jeho úkolem je generovat a přijímat zprávy ze sítě s určením priority. Generování zpráv má na starost modul EtherTrafGen.

**EtherQoSQueue** Je víceprvkový modul složený z modulů classifier, který má za úkol rozpoznat důležitost zpráv. DataQueue, kde jsou přenášeny zprávy s vyšší prioritou a pauseQueue, kde jsou uloženy data s nižší prioritou a čekají na vyřízení dat s prioritou vyšší.

**IecNportFifoSwitch, IecNportSwitch a IecSwitch** Jsou víceprvkové moduly, které slouží jako moduly přepínačů s předem nedefinovaným počtem účastníků, kromě IecSwitche, kde se počet připojených účastníků musí předem nastavit.

IecSwitch má navíc od IecNportFifoSwitch a IecNportSwitche modul EtherQoSQueue a místo modulu Gate má modul EtherMACFullDuplex. Přepínače se dále skládají s modulů MacTable, který slouží k učení portů a MAC adres pomocí přiloženého textového souboru, není nutností použít. Dále IecNportFifoSwitch a IecNportSwitche obsahují modul Gate, který slouží pro příjem a odesílání zpráv a jeho počet je za provozu schodný s počtem připojených účastníků. Následně u nich je RelayUnit, který slouží k přepínání zpráv na správný port.

### 3.4 Testovací simulace

Testovací simulace se skládá ze čtyř prvků PC, které slouží k řízení komunikace, následně jsou zde čtyři MU pro generování hodnot, čtyři zařízení Inter a čtyři zařízení

Com pro ovlivňování jednotek MU. Dále jeden přepínač IecNportFifoSwitch, čtyři přepínače IecNportSwitch a jedno zařízení SCADA.

Zapojení prvků je následující: Inter1, Com1, Mu1 a PC2 jsou zapojeny pomocí ethernetového kabelu s omezenou rychlostí 100 Mb/s a chybovostí paketů 0,01 % do Switch1. Inter2, Com2, Mu2 a PC1 jsou zapojeny pomocí ethernetového kabelu s omezenou rychlostí 100 Mb/s a ztrátovostí paketů 0,01 % do Switch2. Inter3, Com3, Mu3 a PC3 jsou zapojeny pomocí ethernetového kabelu s omezenou rychlostí 100 Mb/s a chybovostí paketů 0,01 % do Switch3. Inter4, Com4, Mu4 a PC4 jsou zapojeny pomocí ethernetového kabelu s omezenou rychlostí 100 Mb/s a ztrátovostí paketů 0,01 % do Switch4. Switch1, Switch2, Switch3 a Switch4 jsou zapojeny do FiFoSwitche za pomoci optického kabelu s rychlostí 40 Gb/s a ztrátovostí paketů 0,001 %. Stejným způsobem je zapojen i počítač SCADA. Natavení simulace a prvků je následující:

Výpis 3.1: Základní nastavení simulace.

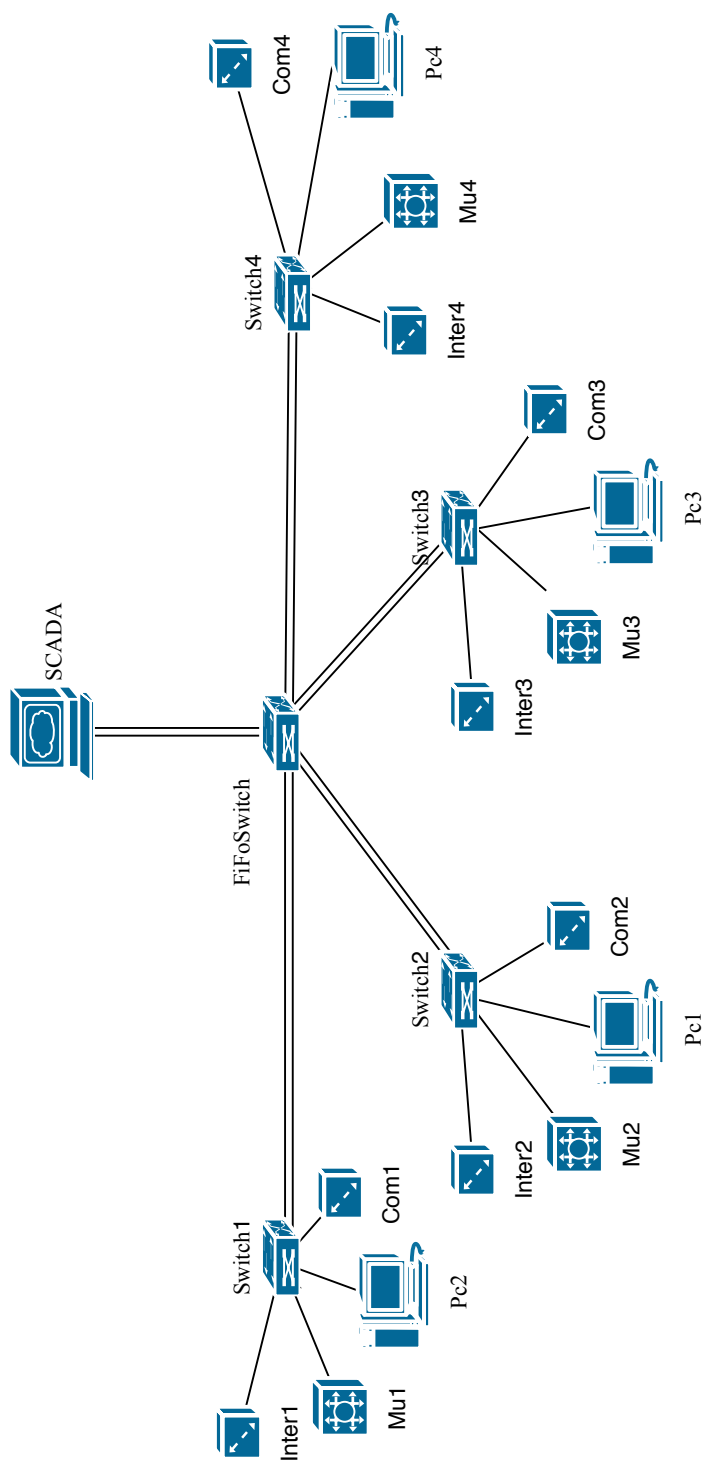
```
**.Pc*.goMod.startTime = 0s
**.Pc*.goMod.iedType = default
**.Pc*.goMod.goID = "GOOSEIDPC"
**.Pc*.subs.sendInterval = 0s
**.Inter*.cli.startTime = 0s
**.Inter*.cli.iedType = "inter"
**.Inter*.cli.goID = "GOOSEIDINTER"
**.Com*.cli.startTime = 0s
**.Com*.cli.iedType = "com"
**.Com*.cli.goID = "GOOSEIDCOM"
**.Mu*.cli.startTime = 0s
**.Mu*.cli.iedType = "mu"
```

Ve výpisu 3.1 je nastavení intervalu odeslání první zprávy, určení skupiny zařízení a jejich typ.

Výpis 3.2: Základní nastavení SCADA.

```
**.SCADA.csmacdSupport = false
**.SCADA.mac.address = "B8:89:B9:20:FF:FF"
**.SCADA.app.destAddress = default
**.SCADA.app.packetLength = 150B
```

Ve výpisu 3.2 je nastavení MAC adresy SCADA zařízení, velikost paketu a cílová MAC adresa.



Obr. 3.1: Schéma zapojení.



Výpis 3.3: Základní nastavení PC4.

```

**.Pc4.mac.address = "B8:89:B9:23:02:01"
**.Pc4.mac.multiCastGroupAddr0 = "01:0C:CD:01:04:FF"
**.Pc4.mac.multiCastGroupAddr1 = "01:0C:CD:04:04:FF"
**.Pc4.goMod.myAppID = 0x0031
**.Pc4.goMod.interAppID0 = 0x0032

```

Ve výpisu 3.3 je nastavení MAC adresy zařízení *Pc*, multicastové adresy pro rozesílání GOOSE a SMV zpráv, jeho ID a ID aplikací, na které má rozesílat zprávu. Nastavení pro další zařízení *Pc* v tabulce 3.1.

Tab. 3.1: Nastavení rozhraní *Pc*.

Pc	MAC adresa	Multicast GOOSE	Multicast SMV	ID
Pc1	B8 89 B9 20 02 01	01 0C CD 01 01 FF	01 0C CD 04 01 FF	0x0001
Pc2	B8 89 B9 21 02 01	01 0C CD 01 02 FF	01 0C CD 04 02 FF	0x0011
Pc3	B8 89 B9 22 02 01	01 0C CD 01 03 FF	01 0C CD 04 03 FF	0x0021
Pc4	B8 89 B9 23 02 01	01 0C CD 01 04 FF	01 0C CD 04 04 FF	0x0031
Pc5	B8 89 B9 24 02 01	01 0C CD 01 05 FF	01 0C CD 04 05 FF	0x0041
Pc6	B8 89 B9 25 02 01	01 0C CD 01 06 FF	01 0C CD 04 06 FF	0x0051
Pc7	B8 89 B9 26 02 01	01 0C CD 01 07 FF	01 0C CD 04 07 FF	0x0061
Pc8	B8 89 B9 27 02 01	01 0C CD 01 08 FF	01 0C CD 04 08 FF	0x0071
Pc9	B8 89 B9 28 02 01	01 0C CD 01 09 FF	01 0C CD 04 09 FF	0x0081
Pc10	B8 89 B9 29 02 01	01 0C CD 01 0A FF	01 0C CD 04 0A FF	0x0091

Výpis 3.4: Základní nastavení Inter4.

```

**.Inter4.mac.address = "B8:89:B9:23:02:02"
**.Inter4.mac.multiCastGroupAddr0 = "01:0C:CD:01:04:FF"
**.Inter4.cli.destAddress = "01:0C:CD:01:04:FF"
**.Inter4.cli.cbRef = "IEDINTER4/LLN0$G0$Eval"
**.Inter4.cli.dataSetRef = "IEDINTER4/LLN0$Eval
$Eval_DataSet"
**.Inter4.cli.myAppID = 0x0032
**.Inter4.cli.pcAppID0 = 0x0031
**.Inter4.cli.comAppID0 = 0x033

```

Ve výpisu 3.4 je nastavení MAC adresy zařízení *Inter*, multicastové adresy pro rozesílání a příjem GOOSE zpráv, jelikož rozhraní *Inter* má na starost příjem a rozesílání pouze GOOSE zpráv se změnou hodnoty, jeho ID a ID aplikací, na které má rozesílat zprávu. Nastavení pro další zařízení *Inter* v tabulce 3.2.

Tab. 3.2: Nastavení rozhraní Inter.

Inter	MAC adresa	Multicast GOOSE	ID
Inter1	B8 89 B9 20 02 02	01 0C CD 01 01 FF	0x0002
Inter2	B8 89 B9 21 02 02	01 0C CD 01 02 FF	0x0012
Inter3	B8 89 B9 22 02 02	01 0C CD 01 03 FF	0x0022
Inter4	B8 89 B9 23 02 02	01 0C CD 01 04 FF	0x0032
Inter5	B8 89 B9 24 02 02	01 0C CD 01 05 FF	0x0042
Inter6	B8 89 B9 25 02 02	01 0C CD 01 06 FF	0x0052
Inter7	B8 89 B9 26 02 02	01 0C CD 01 07 FF	0x0062
Inter8	B8 89 B9 27 02 02	01 0C CD 01 08 FF	0x0072
Inter9	B8 89 B9 28 02 02	01 0C CD 01 09 FF	0x0082
Inter10	B8 89 B9 29 02 02	01 0C CD 01 0A FF	0x0092

Výpis 3.5: Základní nastavení Com4.

```

**.Com4.mac.address = "B8:89:B9:23:02:03"
**.Com4.mac.multiCastGroupAddr0 = "01:0C:CD:01:04:FF"
**.Com4.cli.destAddress = "01:0C:CD:01:04:FF"
**.Com4.cli.cbRef = "IEDCOM4/LLN0$G0$EVal"
**.Com4.cli.dataSetRef = "IEDCOM4/LLN0$Eval$Eval_DataSet"
**.Com4.cli.myAppID = 0x0033 #APPID do com
**.Com4.cli.interAppID0 = 0x0032 #APPID do inter1

```

Ve výpisu 3.5 je nastavení MAC adresy zařízení *Com*, multicastové adresy pro rozesílání a příjem GOOSE zpráv, jelikož rozhraní *Com* má na starost příjem a rozesílání pouze GOOSE zpráv se změnou hodnoty, jeho ID a ID aplikací, na které má rozesílat zprávu. Nastavení pro další zařízení *Com* v tabulce 3.3.

Výpis 3.6: Základní nastavení MU4.

```

**.Mu4.mac.address = "B8:89:B9:22:02:04"
**.Mu4.cli.destAddress = "01:0C:CD:04:04:FF"

```

Ve výpisu 3.6 je nastavení MAC adresy zařízení *Mu*, multicastové adresy pro rozesílání SMV zpráv, jelikož rozhraní *MU* má na starost příjem a rozesílání pouze *Mu* zpráv se změnou hodnoty. Nastavení pro další zařízení *Mu* v tabulce 3.4.

Aplikace je spustitelná v rozhraní OMNeT++ verze 4.6 za použití INET frameworku verze 2.5.0 a INET MAMETu od Hectora Leóna. Spouští se v levém okně prostředí OMNeT++. V projektu *Test* v adresáři *src* je soubor *zkouska.ini*. Jeho spuštěním jako OMNeT++ simulaci se následně aplikace spustí v prostředí Tkenv. Následně si můžeme v horní liště tlačítkem Přehrát spustit simulaci.

Tab. 3.3: Nastavení rozhraní Com.

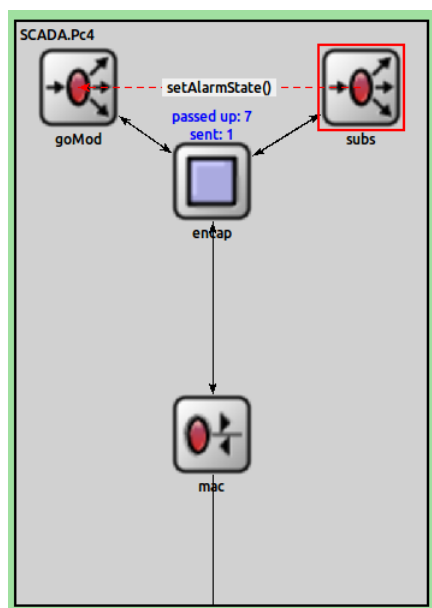
Com	MAC adresa	Multicast GOOSE	Multicast SMV	ID
Com1	B8 89 B9 20 02 01	01 0C CD 01 01 FF	01 0C CD 04 01 FF	0x0003
Com2	B8 89 B9 21 02 01	01 0C CD 01 02 FF	01 0C CD 04 02 FF	0x0013
Com3	B8 89 B9 22 02 01	01 0C CD 01 03 FF	01 0C CD 04 03 FF	0x0023
Com4	B8 89 B9 23 02 01	01 0C CD 01 04 FF	01 0C CD 04 04 FF	0x0033
Com5	B8 89 B9 24 02 01	01 0C CD 01 05 FF	01 0C CD 04 05 FF	0x0043
Com6	B8 89 B9 25 02 01	01 0C CD 01 06 FF	01 0C CD 04 06 FF	0x0053
Com7	B8 89 B9 26 02 01	01 0C CD 01 07 FF	01 0C CD 04 07 FF	0x0063
Com8	B8 89 B9 27 02 01	01 0C CD 01 08 FF	01 0C CD 04 08 FF	0x0073
Com9	B8 89 B9 28 02 01	01 0C CD 01 09 FF	01 0C CD 04 09 FF	0x0083
Com0	B8 89 B9 29 02 01	01 0CCD 01 0A FF	01 0CCD 04 0A FF	0x0093

V simulaci rozhraní Mu odesílají zprávy o stavu systému na rozhraní PC pomocí SMV zpráv, zpráva obsahuje aktuální stav systému, který je závislý na sekvenčním čísle zprávy. Po čase dojde abnormální zpráva o stavu napětí nebo proudu, kdy se hodnota blíží 120 A nebo 136 V a na to je odeslána GOOSE zpráva o úpravě hodnot, jak je zobrazeno na obrázku 3.2. Hodnoty jsou předdefinovány frameworkem INET MANET.

Tab. 3.4: Nastavení rozhraní Mu.

Mu	MAC adresa	Multicast SMV
Mu1	B8 89 B9 20 02 04	01 0C CD 04 01 FF
Mu2	B8 89 B9 21 02 04	01 0C CD 04 02 FF
Mu3	B8 89 B9 22 02 04	01 0C CD 04 03 FF
Mu4	B8 89 B9 23 02 04	01 0C CD 04 04 FF
Mu5	B8 89 B9 24 02 04	01 0C CD 04 05 FF
Mu6	B8 89 B9 25 02 04	01 0C CD 04 06 FF
Mu7	B8 89 B9 26 02 04	01 0C CD 04 07 FF
Mu8	B8 89 B9 27 02 04	01 0C CD 04 08 FF
Mu9	B8 89 B9 28 02 04	01 0C CD 04 09 FF
Mu10	B8 89 B9 29 02 04	01 0C CD 04 0A FF

Po spuštění simulace nejdříve každé zařízení naváže spojení s lokálním přepínačem, aby věděl, jaké zařízení má na kterém portu připojené. Zařízení *Mu* odesílají SMV zprávu o velikosti 136 bajtů, zařízení *Pc* GOOSE zprávu o velikosti 147 bajtů, zařízení *Com* GOOSE zprávu o velikosti 150 bajtů a zařízení *Inter* GOOSE zprávu o velikosti 156 bajtů. Následně zařízení *Mu* začnou rozesílat multicastovou zprávu



Obr. 3.2: Nastavení alarmové hodnoty.

se stavem systému pravidelně každých 0,208 ms (milisekundy). V čase 0,83 ms je odeslána SMV zpráva, která obsahuje informace o překročení mezní hodnoty napětí nebo proudu. Následně po obdržení zprávy na *Pc*, je v čase 0,87 ms , vygenerována GOOSE zpráva o změně jeho stavu pro zařízení *Inter*, jak je znázorněno na snímku 3.3. Dále je na snímku znázorněno zahození zpráv, které nejsou určeny pro dané zařízení.

```

0.00083442 ---> mac req-171-4 EtherSvData:106 bytes ETH: 88-89-B9-21-02-04 > 01-0C-CD-04-02-FF (136 bytes)
0.000835604 ---> mac req-211-3 EtherSvData:106 bytes ETH: 88-89-B9-22-02-04 > 01-0C-CD-04-04-FF (136 bytes)
0.000836788 ---> mac req-168-4 EtherSvData:106 bytes ETH: 88-89-B9-20-02-04 > 01-0C-CD-04-01-FF (136 bytes)
0.000837876 mac --> encap req-168-4 EtherSvData:106 bytes ETH: 88-89-B9-20-02-04 > 01-0C-CD-04-01-FF (128 bytes)
0.000837876 encap --> subs req-168-4 EtherSvData:106 bytes
0.000837876 goMod --> encap req-158-2 EtherGooseData:117 bytes
0.000837876 encap --> mac req-158-2 EtherGooseData:117 bytes ETH: 00-00-00-00-00-00 > 01-0C-CD-01-01-FF (139 bytes)
0.000837876 mac --> req-158-2 EtherGooseData:117 bytes ETH: 88-89-B9-20-02-01 > 01-0C-CD-01-01-FF (147 bytes)
0.0010428074 ---> mac req-208-4 EtherSvData:106 bytes ETH: 88-89-B9-22-02-04 > 01-0C-CD-04-03-FF (136 bytes)
0.0010439914 ---> mac req-211-4 EtherSvData:106 bytes ETH: 88-89-B9-22-02-04 > 01-0C-CD-04-04-FF (136 bytes)
0.0010451754 ---> mac req-168-5 EtherSvData:106 bytes ETH: 88-89-B9-20-02-04 > 01-0C-CD-04-01-FF (136 bytes)

```

Obr. 3.3: Přijetí alarmové zprávy.

V čase 1.03 ms, je obdržena zpráva na zařízení *Inter* o změně svého stavu. Následně může poslat zprávu na rozhraní *Com*, případně může zařízení *Pc* generovat zprávu pro rozhraní *Com*. V tomto scénáři proběhne 15 iterací.

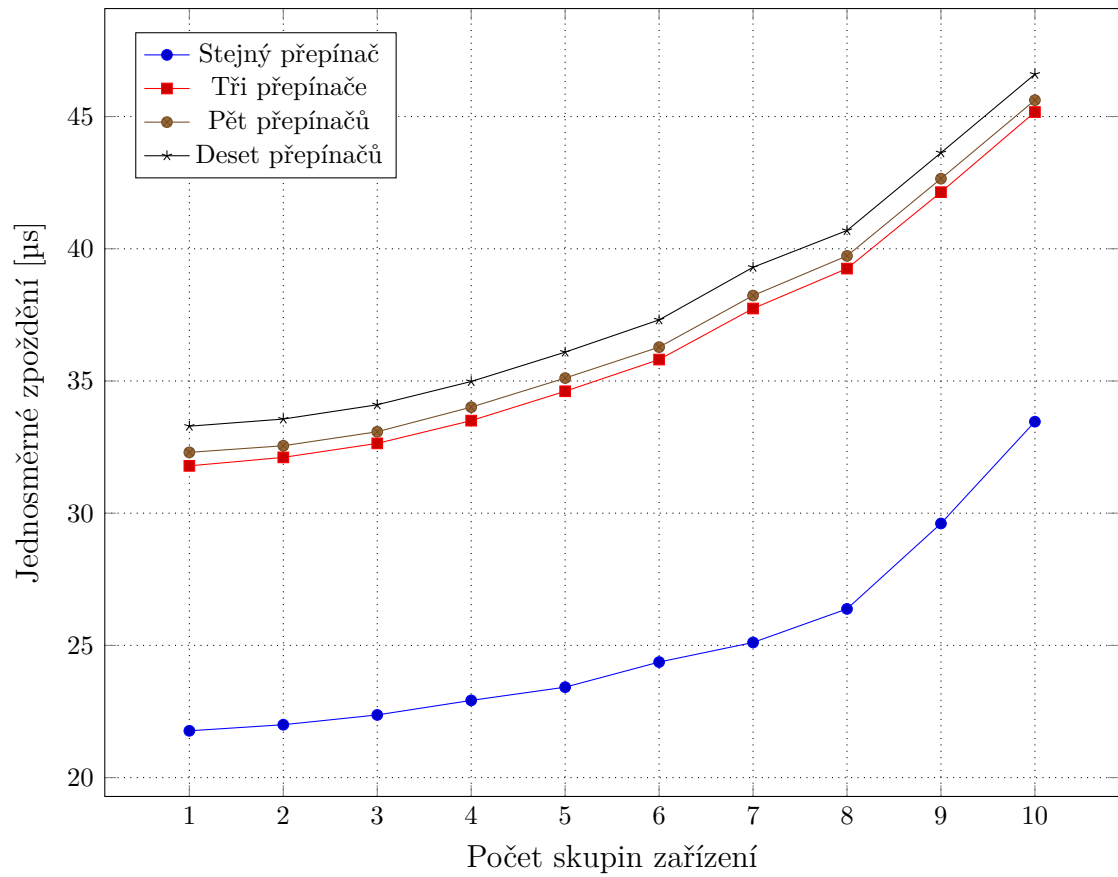
## 3.5 Testování simulace

Následně na tomto scénáři bylo odměřeno jednosměrné zpoždění, jelikož si zařízení nepošílají odpovědi o doručení zprávy. Jednosměrné zpoždění bylo měřeno při narůs-

tajícím zatížením sítě, kdy se pro každé kolo měření přidala jedna skupina zařízení, která obsahovala přepínač, jednotku *Mu*, *Inter*, *Com* a *Pc* do systému. Na schématu zapojení 3.1 jsou znázorněny čtyři skupiny zařízení, kde *Pc1* a *Pc2* jsou zapojeny přes tři přepínače. Každé měření bylo opakováno desetkrát a následně byl spočítán průměr zpoždění. Nejdříve měření probíhalo, když zařízení *Pc* a *Mu* byly zapojeny do stejného přepínače. Následně bylo provedeno měření, když zařízení *Pc* a *Mu* byly zapojeny přes 3, 5 a 10 přepínačů. Průměrný čas jednosměrného zpoždění v závislosti na počtu připojených zařízení je uveden v tabulce 3.5 pro SMV zprávy o velikosti 136 bajtů a v tabulce 3.6 pro GOOSE zprávy o velikosti 147 bajtů. Pro přehlednost jsou změřené a zprůměrované hodnoty vyneseny do grafu 3.4 pro SMV zprávy a v tabulce 3.5 pro GOOSE zprávy. Měření má za úkol zjistit, jaké bude jednosměrné zpoždění zprávy za předpokladu, že zařízení budou umístě v rámci jednoho přepínače a v rámci expandující sítě. Následně byla změřena ztrátovost paketů. Vždy každá skupina poslala tisíc zpráv a na každé další měření se přidala jedna skupina zařízení.

Tab. 3.5: Jednosměrné zpoždění SMV zprávy.

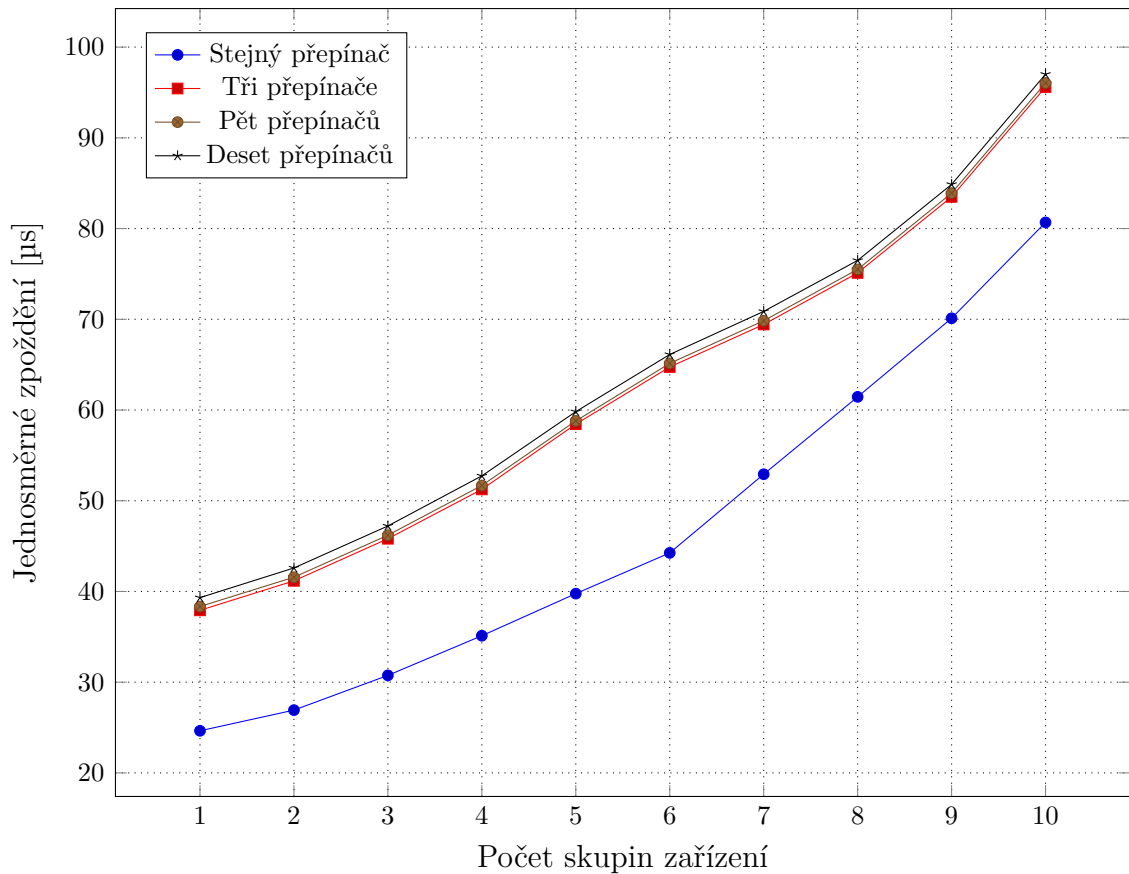
Skupin	1 přepínač [ $\mu$ s]	3 přepínače [ $\mu$ s]	5 přepínačů [ $\mu$ s]	10 přepínačů [ $\mu$ s]
1	21,77	31,79	32,30	33,29
2	22,00	32,11	32,55	33,56
3	22,37	32,64	33,08	34,10
4	22,92	33,50	34,01	34,98
5	23,42	34,61	35,11	36,09
6	24,37	35,81	36,29	37,31
7	25,11	37,74	38,23	39,30
8	26,38	39,25	39,73	40,69
9	29,61	42,14	42,65	43,63
10	33,46	45,17	45,62	46,60



Obr. 3.4: Jednosměrné zpoždění SMV zprávy.

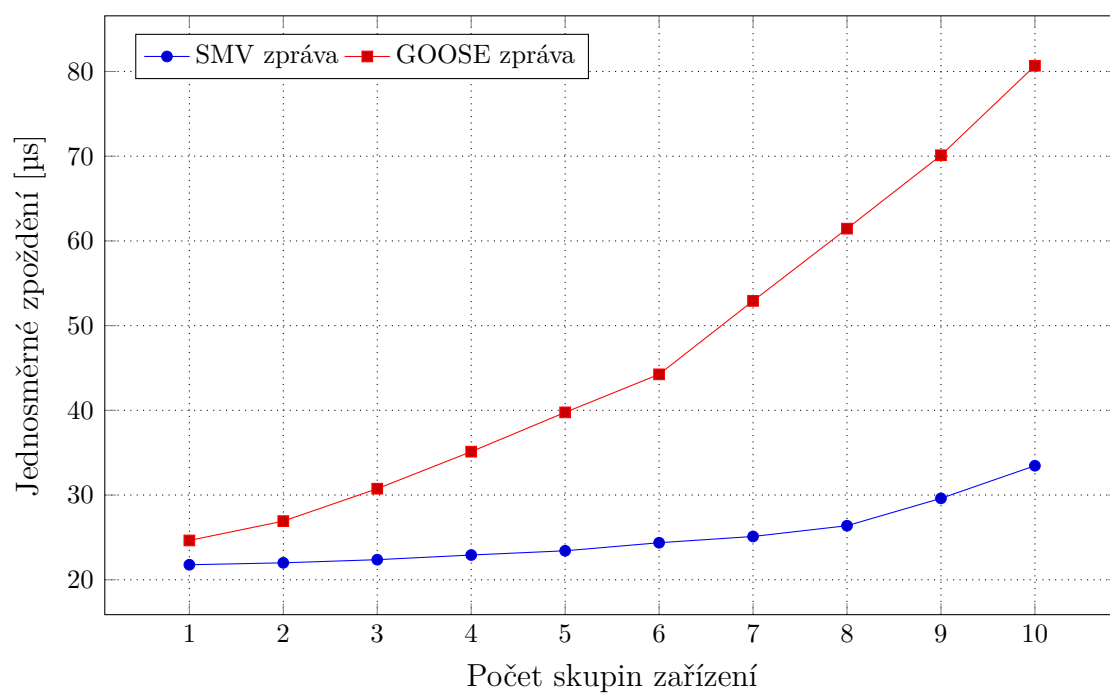
Tab. 3.6: Jednosměrné zpoždění GOOSE zprávy.

Skupin	1 přepínač [μs]	3 přepínače [μs]	5 přepínačů [μs]	10 přepínačů [μs]
1	24,64	37,92	38,34	39,12
2	26,92	41,17	41,57	42,59
3	30,75	45,81	46,20	47,22
4	35,12	51,25	51,68	52,74
5	39,76	58,44	58,80	59,82
6	44,25	64,74	65,14	66,12
7	52,92	69,43	69,84	70,87
8	61,47	75,11	75,50	76,49
9	70,11	83,49	83,91	84,87
10	80,68	95,60	96,04	97,01

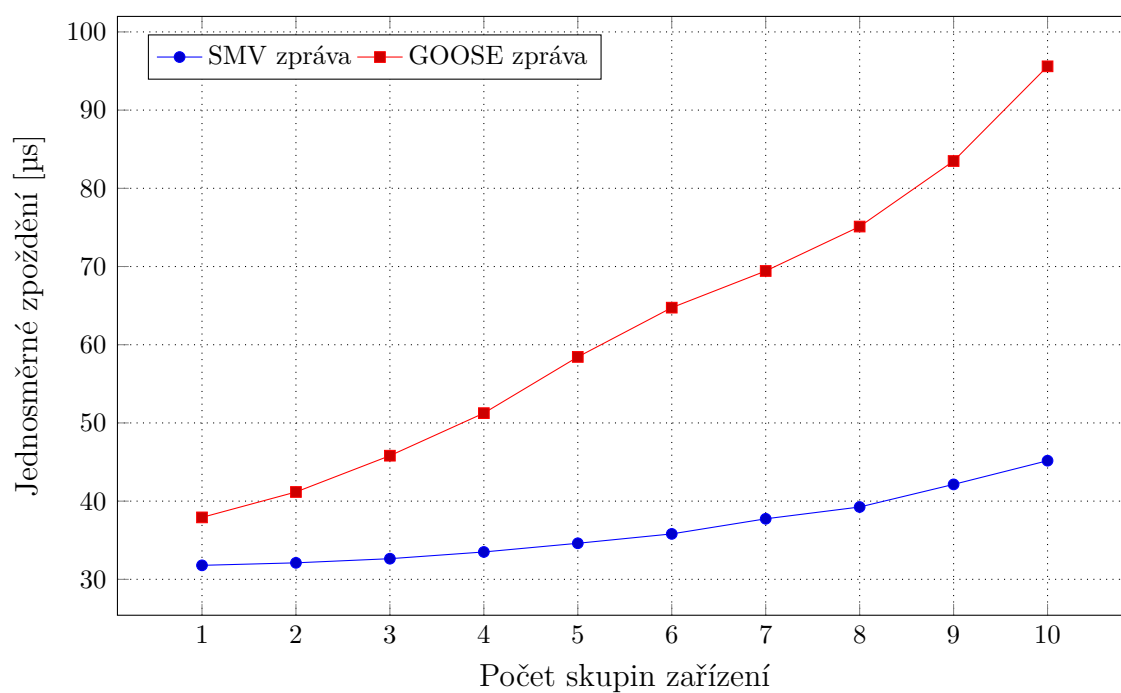


Obr. 3.5: Jednosměrné zpoždění GOOSE zprávy.

Z odměřených hodnot vyplývá, že s počtem narůstajících zařízení připojených do sítě, roste i jednosměrné zpoždění. Zpoždění roste jak u zařízení, která jsou připojená do stejného přepínače, tak i u zařízení, která jsou připojená přes více přepínačů. Toto je způsobeno tím, že jak přepínače, tak i koncová zařízení  $P_c$  musejí obsloužit více paketů, které k nim dorazí díky rozesílání multicastových zpráv. Nárůst jednosměrného zpoždění u SMV zpráv je stále v jednotkách  $\mu s$ . Pro lepší porovnání jsou hodnoty vyneseny do grafů. V grafu 3.6 je znázorněno jednosměrné zpoždění v rámci jednoho přepínače, v grafu 3.7 je znázorněno jednosměrné zpoždění při využití tří přepínačů, v grafu 3.8 je znázorněno jednosměrné zpoždění při využití pěti přepínačů a v grafu 3.9 je znázorněno jednosměrné zpoždění při využití deseti přepínačů. Dále byla změřena ztrátovost paketů, naměřené hodnoty jsou v tabulce 3.7 a následně vyneseny do grafu 3.10. Ztrátovost paketů byla předem definována a naměřené hodnoty tomu odpovídají.

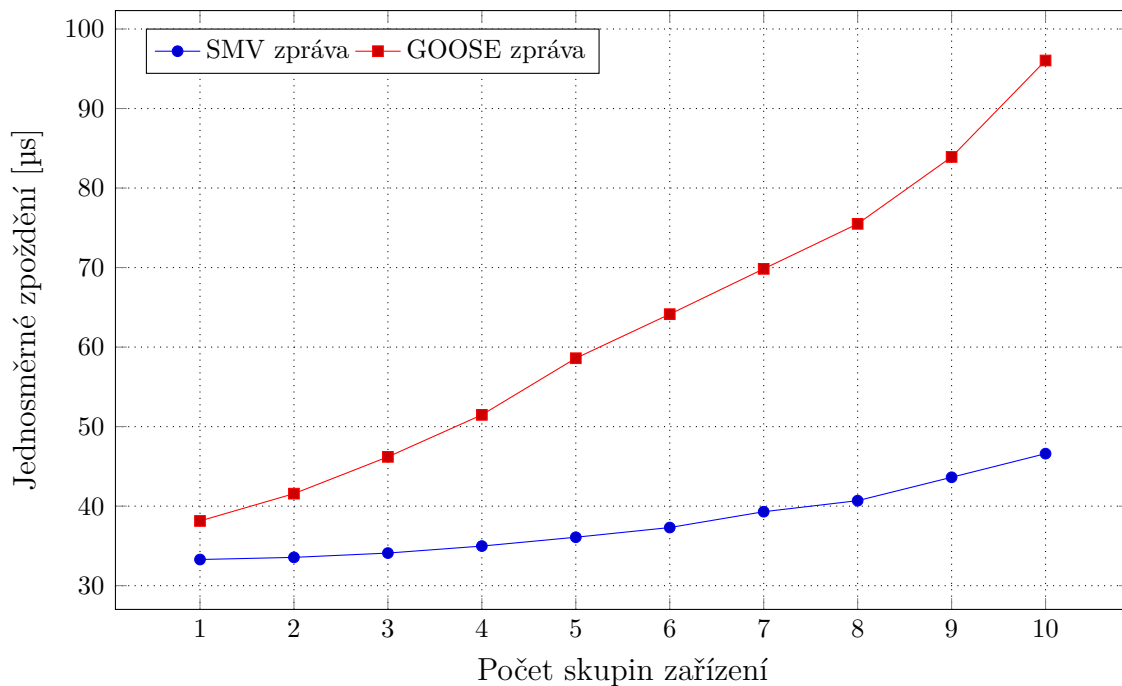


Obr. 3.6: Porovnání jednosměrného zpoždění u SMV a GOOSE zpráv v rámci jednoho přepínače.



Obr. 3.7: Porovnání jednosměrného zpoždění u SMV a GOOSE zpráv za použití tří přepínačů.





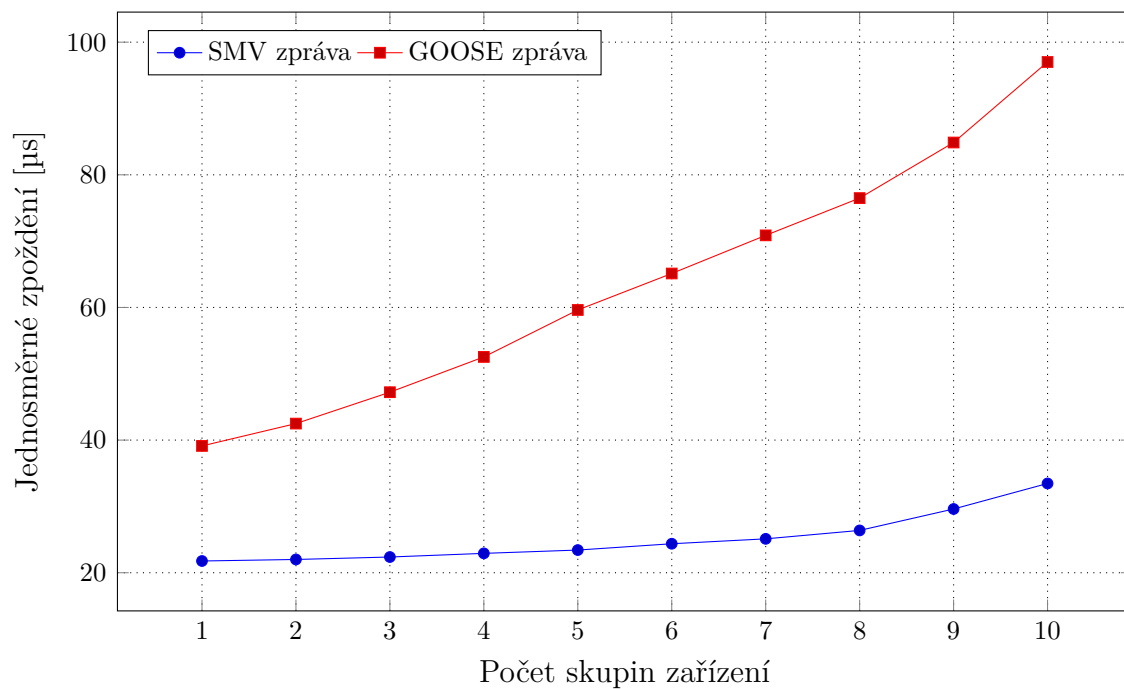
Obr. 3.8: Porovnání jednosměrného zpoždění u SMV a GOOSE zpráv za použití pěti přepínačů.

Tab. 3.7: Ztrátovost paketů.

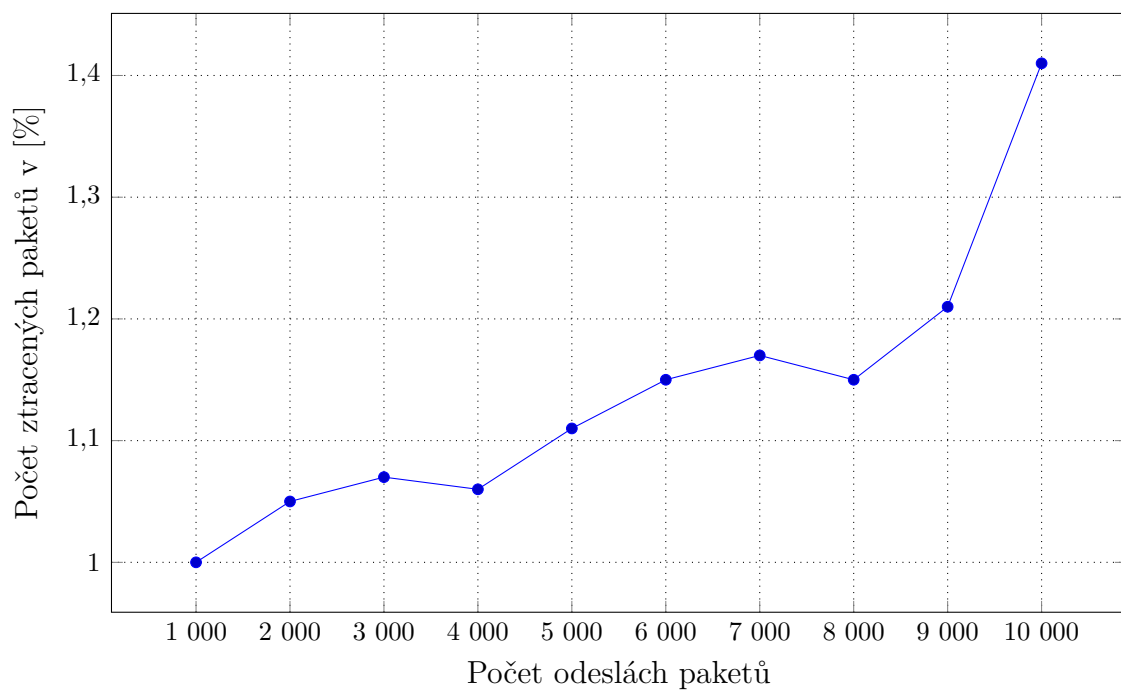
Počet poslaných zpráv	Ztrátovost paketů v [%]
1 000	1
2 000	1,05
3 000	1,07
4 000	1,06
5 000	1,11
6 000	1,15
7 000	1,17
8 000	1,15
9 000	1,21
10 000	1,41

### 3.6 Reporty ze simulace a přístup do ní

Prostředí OMNeT++ umožňuje zaznamenávat průběh celé simulace, umí také zaznamenávat vektorové a skalární veličiny, které umí následně vynést do grafu. Nasta-



Obr. 3.9: Porovnání jednosměrného zpoždění u SMV a GOOSE zpráv za použití deseti přepínačů.



Obr. 3.10: Ztrátovost paketů.

vování provádění záznamu se provádí pomocí *\*.ini* souboru, jeho část je znázorněna ve výpisu 3.7, kde je uvedeno ukládání průběhu komunikace pro všechna zařízení a vektorové záznamy pro všechny Pc a Com. Soubory s hodnotami se ukládají do adresáře *Results*.

Výpis 3.7: Základní nastavení Com4.

```
**pc*.goMod.module-eventlog-recording = true
**com*.cli.module-eventlog-recording = true
**inter*.cli.module-eventlog-recording = true
**mu**.*.module-eventlog-recording = true
**pc*.goMod**.*.vector-recording = true
**com*.cli**.*.vector-recording = true
```

Následně si v adresáři *Results* můžeme přes prostředí OMNeT++ otevřít soubor *General-0.elog*, kde se dá prohlédnout přehledně celá komunikace. Na snímku 3.11 je znázorněna časová osa od vzniku zprávy o alarmovém stavu po jeho přijetí. Případně je zde možný rozbor paketu.

Do simulace je možné vstupovat po připojení zařízení *Router* nebo *StandartHost*, obě zařízení mají rozhraní *ExtInterface*, které umožňuje připojit síťové rozhraní z počítače. Zároveň obě rozhraní umožňují záznam komunikace do *\*.pcap* souborů. Další možnosti záznamu komunikace umožňuje rozhraní OMNeT++ verze 5, které umí vytvářet *\*.pcap* místo záznamu komunikace.



## 4 ZÁVĚR

V této práci byla popsána problematika operačních technologií, komunikace typu člověk - člověk, člověk - stroj, stroj - člověk a stroj - stroj a čím se tyto komunikace liší. Následně proběhlo rozdělení do kategorií chytrý dům, chytré továrny a chytrá města, popisuje se zde, čím se každá kategorie vyznačuje. Také byl popsán Průmysl 4.0, co se od této iniciativy očekává a co je jejím přínosem. Následně byl popsán SCADA systém.

Tato práce je rozdělena do tří kapitol. V kapitole 1 jsou popsány operační technologie, které jsou dále rozděleny na části chytré domy, chytré továrny a města. Také je zde popsán Průmysl 4.0 a dále komunikační technologie, které jsou rozděleny na kabelové technologie a bezdrátové technologie. V části zabývající se kabelovou technologií je popsáno PLC, optické a metalické spojení. Bezdrátové technologie jsou dále rozděleny do částí podle dosahu, následně jsou probrány technologie Wi-Fi, Bluetooth Smart a Wireless M-Bus, které jsou rozděleny do kategorií podle svého dosahu. Dále jsou v této kapitole popsány standardy IEC 61850, Tase.2/ICCP, IEC60870-5-104, DNP3 a DLMS/COSEM. Následně jsou zde popsány parametry, které nám říkají informace o kvalitě spojení jako jsou RSSI, SNR, ztrátovost, šířka pásma, bitová chybovost, zpoždění a Jitter.

V kapitole 2 jsou probrána simulační prostředí NS2/NS3, Riverbed Modeler a OMNeT++, která jsou následně porovnávána v tabulce podle potřebných požadavků.

V kapitole 3 jsou nejdříve popsány frameworky pro prostředí OMNeT++, následně je popsán postup výběru prostředí, proč nebylo možné použít operační systém Windows. Následně byl popsán postup instalace OMNeT++, instalace a import frameworku INET a INET MANET. Dále je popsáno prostředí OMNeT++ včetně prvků pro vytváření simulace podle protokolu IEC 61850. Následně byla vytvořena simulace, na které byl popsán komunikační provoz. Dále byla vytvořena síť, na které byly odměřeny hodnoty jednosměrného zpoždění a ztrátovosti paketů v závislosti na narůstajícím provozu sítě. Nejdříve byl odměřen provoz na síti, kdy zařízení Pc a Mu byla propojena přes jeden přepínač. Další měření proběhlo přes více přepínačů. Naměřené hodnoty byly následně vyneseny do grafu. Dále byl popsán postup vytváření log souborů a jejich rozbor.

# LITERATURA

- [1] ROUSE, Margaret. *Internet of Things (IoT)* [online]. TechTarget, 2016 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <http://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT>
- [2] POHANKA, Pavel. *Internetet věcí* [online]. Pavel Pohanka, 2015 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <http://i2ot.eu/internet-of-things/>
- [3] *Smart grids: Chytrá technologie budoucnosti* [online]. Ekobonus.cz, 2012 [cit. 2017-12-03]. Dostupná z: <https://www.ekobonus.cz/smart-grids-chytre-technologie-budoucnosti>
- [4] HÖLLER, Jan. *From machine-to-machine to the Internet of things: introduction to a new age of intelligence*. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2014. ISBN 978-008-0994-017.
- [5] MAKRIS, Prodromos, Dimitrios N. SKOUTAS, Nikolaos NOMIKOS, Demosthenes VOUYIOUKAS a Charalabos SKIANIS. *A Context-Aware Backhaul Management solution for combined H2H and M2M traffic* [online]. IEEE, 2013 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6705719>
- [6] BLÁHA, Lukáš. *Smart Cities — Chytrá města budoucnosti* [online]. SystemOnline, 2016 [cit. 2017-12-03]. Dostupná z: <https://systemonline.cz/it-security/smart-cities-chytra-mesta-budoucnosti.htm>
- [7] *Industry 4.0 přinese chytré továrny a velkou výzvu pro průmyslové podniky* [online]. JIC, 2016 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <https://www.jic.cz/magazin/industry-40-prinese-chytre-tovarny-a-velkou-vyzvu-pro-prumyslove-podniky/>
- [8] MAŘÍK, Vladimír a kol. *NÁRODNÍ INICIATIVA PRŮMYSL 4.0* [online]. 1. Praha, 2016 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <http://kzps.cz/wp-content/uploads/2016/02/kzps-cr.pdf>
- [9] DANNELS, A. a W. SALTER. *WHAT IS SCADA?*. Trieste, Italy: International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, 1999.
- [10] ADAMO, Francesco, Filippo ATTIVISSIMO, Giuseppe CAVONE a Nicola GI-AQUINTO. *SCADA/HMI Systems in Advanced Educational Courses*. IEEE

- Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2007, **56**(1), 4-10 [cit. 2019-03-10]. DOI: 10.1109/TIM.2006.887216. ISSN 0018-9456. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4061068/>
- [11] HRASNICA, Halid., Abdelfatteh. HAIDINE a R. LEHNERT. *Broadband powerline communications networks: network design*. Hoboken, NJ: Wiley, c2004. ISBN 04-708-5741-2.
- [12] BUBNÍK Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika*. Brno: Code Creator, 2015. ISBN 978-80-88058-20-5.
- [13] *CAT8 Cabling — What Is It and When Will It be Out for Use?* [online]. Vizo-com, 2016 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.vizocom.com/blog/cat8-cabling-will-use/>
- [14] *Serial Wiring* [online]. Tony Lawrence, 1992 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://aplawrence.com/Unixart/serial.art.html>
- [15] MARAIS, Hein. *RS-485/RS-422 Circuit Implementation Guide* [online]. 2008 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-960.pdf?doc=an-1177.pdf>
- [16] POOLE, Ian. *IEEE 802.11 Wi-Fi Standards* [online]. Radio-Electronics.com, 2017 [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11-standards-tutorial.php>
- [17] *Wi-Fi HaLow alias 802.11ah pro Internet věcí* [online]. BusinessIT.cz, 2016 [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <http://www.businessit.cz/cz/wi-fi-halow-alias-802-11ah-pro-internet-veci.php>
- [18] POOLE, Ian. *Wireless Meter Bus, WM-Bus Technology* [online]. Radio-Electronics.com, 2016 [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wireless-m-bus/basics-tutorial.php>
- [19] VOJÁČEK, Antonín. *Sběrnice Wireless M-BUS - jde to i bezdrátově..* [online]. Automatizace.hw.cz, 2010 [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/sbernice-wireless-mbus-jde-i-bezdratove>
- [20] VIDIM, Jan. *Klient, server, master, slave...: https://elektro.tzb-info.cz/inteligentni-budovy/10273-klient-server-master-slave* [online]. Domat Control System, 2013 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/inteligentni-budovy/10273-klient-server-master-slave>

- [21] MACKIEWICZ, R.E. Overview of IEC 61850 and Benefits. In: *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition* [online]. IEEE, 2006, 2006, s. 623-630 [cit. 2019-03-14]. DOI: 10.1109/PSCE.2006.296392. ISBN 1-4244-0177-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4075831/>
- [22] ADAMIAK, Mark, Baigent DREW a Ralph MACKIEWICZ. *IEC 61850 Communication Networks and Systems In Substations: An Overview for Users* [online]. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <http://www.gegridolutions.com/multilin/journals/issues/-spring09/iec61850.pdf>
- [23] D2000 Dev Team. *IEC 60870-6 ICCP/TASE.2* [online]. 2018 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://doc.ipesoft.com/pages/viewpage.action?pageId=3444925>
- [24] *Telecontrol equipment and systems —Part 6-503: Telecontrol protocols compatible with ISO standards and ITU-T recommendations — TASE.2 Services and protocols* [online]. 3. IEC, 2014 [cit. 2019-03-17]. ISBN 978-2-8322-1647-7. Dostupné z: [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec60870-6-503%7Bed3.0%7Db.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60870-6-503%7Bed3.0%7Db.pdf)
- [25] *IEC 60870-5-104* [online]. IPCOMM [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <https://www.ipcomm.de/protocol/IEC104/en/sheet.html>
- [26] *IEC 60870-5-101* [online]. IPCOMM [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <https://www.ipcomm.de/protocol/IEC101/en/sheet.html>
- [27] *IEEE Standard for Electric Power Systems Communications-Distributed Network Protocol (DNP3)* [online]. 2012 [cit. 2019-03-10]. DOI: 10.1109/IEEESTD.2012.6327578. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6327578/keywords#keywords>
- [28] *Protocolo DNP3* [online]. One Touch Electro Industria, 2009 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1132>
- [29] VYAS, Divyang a H. PANDYA. *Advance Metering Infrastructure and DLMS/COSEM Standards for Smart Grid* [online]. 1. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2012 [cit. 2019-03-17]. ISSN 2278-0181. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/282787864\\_Advance\\_Metering-Infrastructure\\_and\\_DLMSCOSEM\\_Standards\\_for\\_Smart\\_Grid](https://www.researchgate.net/publication/282787864_Advance_Metering-Infrastructure_and_DLMSCOSEM_Standards_for_Smart_Grid)
- [30] FAHEEM, A., R. VIRRANKOSKI a M. ELMUSRATI. *Improving RSSI based distance estimation for 802.15.4 wireless sensor networks* [online]. , 1-4 [cit. 2017-12-13]. Dostupné



- z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.469.884&rep=rep1&type=pdf>
- [31] *Radio Signal to Noise S/N Ratio, SNR* [online]. electronics-notes.com, 2017 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/radio-receiver-sensitivity/signal-to-noise-ratio-s-n-snr-formula.php>
- [32] DERICKSON, Dennis. *Fiber optic test and measurement*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, c1998. ISBN 01-353-4330-5.
- [33] NS-3 PROJECT. *NS-3 Manual* [online]. 3. 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.nsnam.org/docs/manual/ns-3-manual.pdf>
- [34] *Riverbed Modeler* [online]. 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: [https://www.riverbed.com/document/fpo/9306\\_Riverbed\\_Modeler\\_DS\\_-101314KC-2.pdf](https://www.riverbed.com/document/fpo/9306_Riverbed_Modeler_DS_-101314KC-2.pdf)
- [35] *OMNeT++: User Manual* [online]. OMNeT++, 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://doc.omnetpp.org/omnetpp4/manual/usman.html>

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

BER	Bit Error Rate
COSEM	Companion Specification for Energy Metering
dB	Decibel
dBm	Decibel on milliwatt
DLMS	Distribution Line Message Specification
DNP	Distributed Network Protokol
EPA	Enhanced Performance Architecture
E2E	End to End
GB	Gigabajt
Gb/s	Gigabit per second
GHz	Gigahertz
GOOSE	Generic Object Oriented Substation Events
GPRS	General Packet Radio Service
GSSE	Generic Substation State Events
GSM	Global System for Mobile Communications
HLDC	High - Level Data Link Control
HMI	human machine interface
ICCP	Inter-Control Centre Communications Protocol
IEC	International Electrotechnical Commission's
IDE	Inteligentní elektronické zařízení
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet věcí - Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISO/OSI	International Organization for Standardization/Open Systems Interconnection
IT	informační technologie
kb/s	kilobit per second
kHz	kilohertz
km	kilometr
LED	Light Emitting Diode
LTE	Long Term Evolution
Max	Maximum
Mb/s	Megabit per second
MHz	Megahertz
MMS	Manufacturing Message Specification
M2M	Machine to Machine

ms	milisekunda
nm	nanometr
NS	Network simulator
OMNeT++	Objective Modular Network Testbed in C++
OT	operační technologie
OPC	OLE for Process Control
PLC	Power-line communication
PPP	Point-to-Point Protoco
PSTN	public switched telephone network
RS	Recommended Standard
RSSI	Received Signal Strength Indication
RTT	Round Trip Time
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCSM	Specific Communication Service Mapping
SNR	Signal-to-noise ratio
SMV	Sampled Measured Values
TASE2	Telecontrol Application Service Element 2
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
USA	United States of America
UTP	Unshielded Twisted Pair
WI-FI	Wireless - Fidelity
$\mu m$	mikrometr
$\mu s$	mikrosekunda
€	Euro

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Soubor norem pro IEC 61850</b>	<b>60</b>
<b>B</b>	<b>Soubor norem pro TASE.2/ICCP</b>	<b>61</b>
<b>C</b>	<b>Obsah přiloženého DVD disku</b>	<b>62</b>
C.1	Elektronická verze diplomové práce . . . . .	62
C.2	Ubuntu 14.04 s nainstalovaným OMNeT++ . . . . .	62
C.3	Simulace . . . . .	62
C.4	Instalační soubory . . . . .	62

## A SOUBOR NOREM PRO IEC 61850

- IEC 61850-1 - Úvod a přehled.
- IEC 61850-2 - Výklad zvláštních výrazů.
- IEC 61850-3 - Všeobecné požadavky.
- IEC 61850-4 - Systémové a projektové řízení.
- IEC 61850-5 - Požadavky na komunikaci pro funkce a modely zařízení.
- IEC 61850-6 - Konfigurační jazyk pro komunikaci v elektrických rozvodnách souvisejících s IDE (Inteligentní elektronické zařízení).
- IEC 61850-7-1 - Základní komunikační struktura pro podřízené stanice a napájecí zařízení - Zásady a modely.
- IEC 61850-7-2 - Základní komunikační struktura pro podřízené stanice a napájecí zařízení - Abstraktní rozhraní pro komunikační služby.
- IEC 61850-7-3 - Základní komunikační struktura pro podřízené stanice a napájecí zařízení – Obecné třídy dat.
- IEC 61850-7-4 - Základní komunikační struktura pro podřízené stanice a napájecí zařízení – Třídy kompatibilních logických uzlů a třídy dat.
- IEC 61850-7-410 - Vodní elektrárny – Komunikace pro sledování a řízení.
- IEC 61850-7-420 - Základní komunikační struktura – Logické uzly pro decentralizované zdroje elektrické energie.
- IEC 61850-8-1 - Mapování specifických komunikačních služeb (SCSM (Specific Communication Service Mapping)) – Mapování na MMS (Manufacturing Message Specification) (ISO 9506-1 a ISO 9506-2) a na ISO/IEC 8802-3.
- IEC 61850-9-1 - Mapování specifických komunikačních služeb (SCSM) – Přenos vzorkovaných hodnot po sériovém jednosměrném (neorientovaném).
- IEC 61850-9-2 - Mapování specifických komunikačních služeb (SCSM) – Vzorované hodnoty z ISO/IEC 8802-3.
- IEC 61850-10 - Zkoušky shody.

Dále s protokolem úzce souvisí následující tři normy:

- IEC 62271-3 - Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení – Část 3: Digitální rozhraní podle IEC 61850,
- IEC/TS 62351-1 Řízení energetických systémů a související výměna informací - Bezpečnost dat a komunikace - Část 1: Zabezpečení komunikačních sítí a systémů - Úvod do problematiky bezpečnosti,
- IEC/TS 62351-6 Řízení energetických systémů a související výměna informací - Bezpečnost dat a komunikace - Část 6: Bezpečnost pro IEC 61850.

## B SOUBOR NOREM PRO TASE.2/ICCP

- IEC 60870-6-1 - Kontext aplikace a organizace norem.
- IEC 60870-6-2 - Použití základních norem (vrstvy OSI 1–4).
- IEC 60870-6-501 - Definice služby TASE.1.
- IEC 60870-6-502 - Definice protokolu TASE.1.
- IEC 60870-6-503 - Služby a protokol TASE.2.
- IEC 60870-6-504 - Konvence uživatele TASE.1.
- IEC TR 60870-6-505 - TASE.2 Uživatelská příručka.
- IEC 60870-6-601 Funkční profil pro poskytování spojově - orientované transportní služby u koncového systému propojeného trvalým přístupem na datovou síť s přepojováním paketů.
- IEC 60870-6-701 - Funkční profil pro poskytování aplikační služby TASE.1 v koncových systémech.
- IEC 60870-6-702 - Funkční profil pro poskytování aplikační služby TASE.2 v koncových systémech.
- IEC 60870-6-802 - Modely objektů TASE.2.

## C OBSAH PŘÍLOŽENÉHO DVD DISKU

### C.1 Elektronická verze diplomové práce

Elektronické verze diplomové práce je umístěna v kořenovém adresáři na DVD.

### C.2 Ubuntu 14.04 s nainstalovaným OMNeT++

Na DVD v adresáři *Virtuální stroj* je umístěn zkomprimovaný virtuální disk s nainstalovaným Ubuntu 14.04. Název souboru je *ubumntuomnet.rar*. Virtuální disk byl vytvořen programem Oracle VM VirtualBox verze 6.0.4. V jeho prostředí je možné spustit s již zkompilovaným OMNeT++, integrovaným prostředím INET a INET MANET a testovací simulací. Dále je v adresáři soubor *README.TXT*, kde jsou uvedeny přihlašovací údaje a postup spuštění testovacích dat.

### C.3 Simulace

V adresáři *Simulace* jsou umístěny soubory *zkouska.ned* a *zkouska.ini*, které slouží ke spuštění simulace.

### C.4 Instalační soubory

Na přiloženém disku se dále nacházejí soubory, které byly při práci použity:

**VirtualBox-6.0.6.exe** Instalační verze programu Oracle VM VirtualBox verze 6.0.6 pro OS Windows.

**Omnetpp-4.6-src.tgz** Zdrojové soubory OMNeT++ verze 4.6 pro OS Linux.

**Inet-framework-2.5.0-src.tgz** Zdrojové soubory frameworku INET.

**Inetmant.zip** Zdrojové soubory frameworku INET MANET.

**Ubuntu-14.04.iso** Instalační obraz CD Ubuntu verze 14.04.